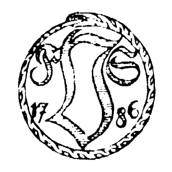
Hoppe, Edmund.
Geschichte der Physik
1926.

Edmund Hoppe

Geschichte der Physik



Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges. in Braunschweig
1926



Vorwort.

Geschichte der Physik, nicht Geschichte der Physiker, auch nicht Geschichte der naturphilosophischen Anschauungen, nenne ich dieses Buch. Wohl gibt es in den verschiedenen Zeitabschnitten mehr oder weniger vorherrschende Gesamtideen in der Physik, aber sie sind nur fruchtbar gewesen, soweit sie aus den Forschungsergebnissen über die Einzelprobleme hervorgegangen sind. Diese Einzelprobleme müssen konstitutiv sein für die Gesamtanschauung. Sie aber haben eine Geschichte! Und die Geschichte dieser Probleme ist es, die ich darzustellen versuche. Ich sage „versuche". Denn ich bin mir durchaus bewußt, daß gar vieles fehlt, was für eine vollständige Geschichte der Probleme notwendig wäre. Wenn ich auch mehrere Jahrzehnte daran gearbeitet habe, die Entwicklung der einzelnen Fragen festzustellen, so war es mir doch nicht möglich, die gesamte Literatur zu umfassen; und auch nicht alles, was ich gefunden habe, konnte in diesem Bande aufgenommen werden, da der Umfang den Zeitverhältnissen entsprechend von vornherein begrenzt war. Ich mußte daher einiges sehr kurz fassen, anderes ganz fortlassen, was ich gern gesagt hätte. Es mag daher der Leser wohl manches vermissen und einiges, was in dem Buche erwähnt ist, für nicht so wichtig halten wie das Vermißte; doch hoffe ich, wirklich Bedeutendes und für die Weiterentwicklung der Physik Wertvolles nicht übersehen zu haben; aber ich werde sehr dankbar sein, wenn ich auf solche Lücken aufmerksam gemacht werde. Um dem Leser die Möglichkeit zu geben, ohne zeitraubendes Suchen sich über die einzelnen Fragen weiter zu unterrichten, habe ich mich bemüht, immer die Originalabhandlung anzugeben oder, wo mir diese unerreichbar war, die Quelle, aus welcher ich selbst schöpfte. Um den rein physikalischen Problemen möglichst gerecht zu werden, mußte ich alle Fragen der angewandten Physik beiseite lassen, selbst die der Elektrotechnik. Für die Zeit bis 1884 habe ich die Geschichte dieser Technik in meiner Geschichte der Elektrizität gegeben.

Für die ausländische Literatur verdanke ich der vortrefflichen History of the Theories of Aether and Electricity von E. T. Whittaker, 1910, manchen Fingerzeig. Für die Geschichte des Mittelalters ist es sehr zu beklagen, daß die außerordentlich wertvollen Handschriften der Pariser Bibliothek noch immer nicht veröffentlicht sind. Freilich hat Duhem sie in seinen letzten drei umfangreichen Werken ausgiebig benutzt, aber eben nur benutzt, und zwar in freundlicher Hinneigung zur peripathetischen Philosophie, die doch nach den gedruckten Werken des 15. und 16. Jahrhunderts mehr hindernd als fördernd auf das Aufblühen der Physik gewirkt hat.

Ich habe im wesentlichen mit dem Jahre 1895 abgeschlossen und gehe nur in solchen Fragen über dieses Jahr hinaus, die bald nachher durch eine abschließende Untersuchung an ein einstweiliges Ziel gekommen sind. Die Entdeckungen jener Jahre 1895—1901 sind die Fundamente, worauf der gegenwärtige Neubau der Physik errichtet wird. Man drückt sich bisweilen so aus, als ob die moderne Physik in schroffem Gegensatz gegen die klassische stehe, oder doch wenigstens der klassischen durchaus entbehren könne. Ich hoffe, in diesem Buche die Fäden aufgezeigt zu haben, die direkt aus der klassischen Physik in die moderne überführen, so daß trotz des sehr veränderten Gesichts die Kontinuität wissenschaftlicher Forschung deutlich hervortritt, und meine, es müßte für wissenschaftliche Arbeit auch interessant und wertvoll sein, die Gedankenreihe in ihrer allmählichen Entwicklung bis zur ersten Quelle zurück verfolgen zu können.

Göttingen, im März 1925.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung.

Die Geschichte der Physik beginnt, wie die Geschichte der Wissenschaft in Europa überhaupt, mit der Geschichte der Griechen. Ob die chinesische Wissenschaftsentwicklung wirklich bis zu einer Zeit von 1200 Jahren vor unserer Zeitrechnung zurückreicht, ob sie wirklich durchaus selbständig, ohne Anregung von anderer Seite entstanden ist, muß heute noch als offene Frage behandelt werden. Für die Entwicklung der gegenwärtigen Physik ist dieselbe von keiner Bedeutung, sie hat keinen Einfluß gehabt auf die moderne Physik. Dagegen sind die Gedanken und Anschauungen moderner Physik aufgebaut und emporgewachsen aus Ideen, welche andeutungsweise schon in der griechischen Naturbetrachtung vorkommen.

Aber es muß nun die Frage aufgeworfen werden, ob die Griechen unabhängig ihre Wissenschaft erfunden haben, oder ob sie auch schon Anregung von älteren Völkern empfangen haben. Bis vor wenigen Jahrzehnten war eine solche Untersuchung ohne tatsächliche Grundlage. Wohl gaben verschiedene Äußerungen griechischer Schriftsteller an, daß die an der Spitze stehenden griechischen Forscher in Ägypten Anregungen empfangen hätten, vor allem Thales von Milet und Pythagoras, aber erst seit etwa 100 Jahren war die Möglichkeit gegeben, dieser Spur nachzugehen, nachdem man die Schriftsprache der Ägypter entziffert hatte. Zu den Ägyptern gesellte sich aber ein noch älteres Volk, die Sumerer in Mesopotamien, welche schon den Ägyptern in mancher Beziehung die Wege gewiesen haben. Um also auf die ursprüngliche Quelle wissenschaftlicher Forschung zu kommen, müßte man die Leistungen der alten Babylonier erforschen und von da den Faden entweder direkt oder über Ägypten nach Griechenland weiter verfolgen.

Leider ist eine solche Entwicklungsgeschichte, so interessant dies Problem auch ist, heute noch nicht ausführbar, weil unter den bisher entzifferten Tontafeln noch keine gefunden sind, die uns einen einigermaßen vollständigen Einblick in die naturwissenschaftlichen Kenntnisse der alten Sumerer gestatteten. Wir sind zurzeit

noch auf Kombinationen angewiesen, d. h. wir müssen aus Andeutungen in Inschriften, aus Baudenkmälern und allgemein geschichtlichen Angaben auf naturwissenschaftliche Kenntnisse schließen. War schon aus den ältesten Reliefs ägyptischer Darstellung nachweisbar, daß um 2000 v. Chr. der Hebel, der Keil, die Winde bekannt war, so zeigte die Statue des Königs Gudea, daß in Mesopotamien schon etwa um 4000 v. Chr. die großartigen Tempelbauten nach einem detaillierten Grundriß aufgeführt wurden. Tontafeln und Inschriften zeigen ferner, daß die Wage und Gewichtssysteme schon in der ältesten Zeit bekannt waren und gesetzlich geschützt wurden. Daß dies alles gefunden und in das Wirtschaftsleben der Völker eingedrungen sein sollte ohne irgendwelche physikalische Begründung und experimentelle Prüfung, ist kaum anzunehmen, zumal wir wissen, daß um jene Zeit bereits Schulen bestanden, in denen zum mindesten der Rechenunterricht schon auf einer recht hohen Stufe stand.

Aber die Babylonier blieben nicht bei der Statik stehen. Sie haben auch die Kinetik bereits bearbeitet. Freilich nicht, wie es scheint, um ihrer selbst willen, sondern weil sie deren bedurften für ihre astronomischen Beobachtungen. Durch die ausgezeichneten Untersuchungen Kuglers sind wir über die astronomischen Leistungen in Babylon recht gut unterrichtet und wissen daher, daß die Babylonier die gleichförmige Bewegung von der ungleichförmigen unterschieden, daß sie die gleichförmig beschleunigte und gleichförmig verzögerte Bewegung behandelten, und zwar bestimmten sie die Geschwindigkeit als das Verhältnis von Weg zur Zeit. Sie unterschieden Winkelgeschwindigkeit von Liniengeschwindigkeit[1]) und maßen die Sehnen in den Bögen schon um 2000 v. Chr. Das setzt eine exakte Zeit- und Längenmessung voraus. Ich habe schon früher den Nachweis erbracht, daß die Babylonier unsere moderne Zeitmessung bis ins kleinste fertig ausgebildet haben[2]) und daß diese Zeitmessung teils durch die Griechen, teils durch die Araber uns übermittelt ist.

Und nicht nur theoretisch haben sie die Zeitmessung in der Rechnung ausgebildet, sondern auch technisch. Sie haben die Sonnenuhr erfunden, und zwar die Form, daß nicht die Schattenlänge den Maßstab gab, sondern der Richtungsunterschied des Schattens gegen die Nordsüdlinie. Die Ägypter dagegen maßen

---

[1]) Kugler, Sternkunde u. Sterndienst, II, p. 312.
[2]) Mitteil. der Math. Gesellschaft in Hamburg, Bd. V, p. 261, 1919.

die Schattenlänge und von ihnen haben die Griechen die Sonnenuhr übernommen. Auch sind die Babylonier die Erfinder der Klepshydren, die sowohl für den 60-Stunden-Tag wie für den 12- und 24-Stunden-Tag eingerichtet waren. Sie haben aber nicht nur die Zeit so präzise messen gelehrt, sondern auch Längenmessungen mit Sexagesimalbrüchen ausgeführt. Wahrscheinlich ist auch das älteste Hodometer eine babylonische Erfindung, bei welchem der Radkranz die Länge 1 hatte. Alle diese Errungenschaften haben die Griechen aus Babylon übernommen, aber während wir dort keinerlei Andeutungen über wissenschaftliche Begründungen finden, haben die Griechen alsbald versucht, diese Einzelkenntnisse miteinander zu verbinden und systematische Ableitungen zu geben.

Griechen.

1. Periode.

Die Geschichte der Wissenschaft beginnt bei den Griechen mit der ionischen Philosophenschule oder den Naturphilosophen. In der Regel werden in den Geschichtswerken der Physik nun des breiteren die philosophischen Spekulationen dieser ältesten Gelehrten auseinandergesetzt. Ich unterlasse das, nicht nur, weil dergleichen wohl in eine Geschichte der Philosophie, aber nicht der Physik gehört, sondern vor allem, weil wir von den Leistungen jener Männer keine zusammenhängende Kenntnis besitzen, sondern nur einzelne Zitate, die zum Teil sehr späten Ursprungs sind. Seit Diels in seinen Vorsokratikern und den Doxographen alles gesammelt hat, was aus der späteren griechischen und lateinischen Literatur uns über diese Naturphilosophen berichtet ist, kann man mit leichter Mühe die Fragmente studieren. Uns interessiert nur das direkt mit der Physik in Zusammenhang Stehende. Das ist nun im wesentlichen kosmische Physik, die war es offenbar, welche die Späteren in erster Linie interessierte, und daher sind uns die hierauf bezüglichen Äußerungen am häufigsten erhalten. Ich gehe hier nicht auf die Kosmogonien der Ionier ein; soweit dabei astronomische Erkenntnis und physikalische Resultate eine Rolle spielten, habe ich in einer Abhandlung über das antike Weltbild alles zusammengestellt, was wir zurzeit über diese Entwicklung aussagen können.[1] Nur auf einige Punkte möchte ich besonders hinweisen.

---

[1]) Archiv für die Geschichte der Naturw., Bd. V, p. 73, 1913.

Zunächst ist sicher, daß sowohl Thales (ca. 640—548) wie Pythagoras (ca. 570—480) in Ägypten waren und dort mit den Kenntnissen der Priester und den technischen Leistungen bekannt wurden.[1]) Es ist daher bei den Griechen nirgends eine Erwähnung zu finden über die Entdeckung jener fünf „Potenzen". Die Gesetze für ihre Wirkung dagegen werden später entdeckt (s. u.). Man hat nun den Griechen im allgemeinen und den Ioniern im besonderen vorgeworfen, sie hätten nicht experimentiert, darum seien sie nicht bald weitergekommen in der Erkenntnis, sondern sie hätten nur spekulativ die Naturwissenschaft behandelt. Der Vorwurf ist nicht berechtigt. Schon von Thales wissen wir, daß er Distanzen messen lehrte mit Hilfe ähnlicher Dreiecke (Meßtisch). Von Demokrit wissen wir, daß er viel experimentierte, sogar Vivisektion betrieb, um das tierische Leben zu erforschen, von Aristoteles sind Experimente zur Schwerebestimmung der Luft bekannt. Archimedes und Heron haben eine große Reihe von Experimenten gemacht, und daß viele Äußerungen anderer „Philosophen" nur auf Grund von Experimenten getan werden konnten, werden wir gleich sehen. Was den älteren griechischen Forschern fehlt, ist die systematische Erforschung durch das Experiment. Gelegentliche Beobachtungen führten zu einzelnen Fragen, die mit mehr oder weniger (Aristoteles) Geschick experimentell untersucht wurden, aber es fehlte der Zusammenhang mit den übrigen Gebieten. Eine weitere Ursache des langsamen Fortschritts war, daß die wesentlichsten Anregungen von der babylonischen Astronomie, vielleicht durch Vermittlung Ägyptens, ausgegangen waren und daher das Interesse wesentlich auf kosmische Fragen gerichtet war, die für die physikalischen Kenntnisse viel zu schwer waren, als daß sie mit Erfolg für den physikalischen Fortschritt hätten in Angriff genommen werden können. Trotzdem sind einige wertvolle Entdeckungen bei dieser Beschäftigung auch für die Physik dabei herausgekommen. Wenn Thales außer der schon genannten Beobachtungsmethode auch lehrt, daß die Erde eine Kugel sei und die Oberfläche in fünf Zonen einteilt[2]), wenn er das Mondlicht als reflektiertes Sonnenlicht erkennt und die Entstehung der Mondfinsternis richtig erklärt[3]), so zeigen diese Tatsachen, daß er nicht nur spekulativer Philosoph war.

Bei Heraklit (ca. 500) finden wir die Ansicht, daß alle Dinge in dauernder, gesetzmäßiger Umwandlung begriffen seien, daß

[1]) Hoppe, Mathemat. u. Astr. im kl. Altertum. p. 59ff., 1911.
[2]) Aetius. Plac. II, 12.
[3]) Stobaios. Ecle. I, 26.

nichts verloren gehe. Deutlicher kommt das Gesetz von der Erhaltung des Stoffes noch bei Empedokles († 424) zur Geltung. Alle Dinge sind aus den vier Elementen: Erde, Wasser, Luft und Feuer aufgebaut und die Veränderungen bestehen in einer Mischung und Entmischung der Dinge, so daß die Summe der Materie stets konstant ist.[1]) Ihm wird auch die Erfindung des Stechhebers zugeschrieben.[2])

Von den verschiedenen Kosmogonien interessiert uns die des Anaximenes († ca. 525), weil sie lebhaft an Kant erinnert. Der Weltraum war mit luftartiger Materie erfüllt, diese verdichtete sich zu einem Nebel, bei fortschreitender Verdichtung wurde er flüssig und endlich feste Erde. Die Sterne läßt Anaximenes dann geradeso entstehen, wie Kant den Saturnring aus dem fertigen Saturn, nämlich durch Verdampfung aus der Erde, die Verdampfung ist leichter als Luft, steigt also auf und bildet dann in einzelnen Kugeln (Scheiben) die feurigen Sterne. Dabei legt sich Anaximenes nun selbst die Frage vor: Warum merken wir denn nichts von der Wärmestrahlung dieser feurigen Sterne? Antwort: Weil die Sterne zu weit von uns entfernt sind, sehr viel weiter als die Sonne![3]) Haben wir hier im Altertum einen Vorläufer von Kant, so fehlt auch nicht der Vorläufer von Laplace.

Es ist Anaxagoras (499—428) aus Klazomenä, der während 30 Jahren gefeierte Lehrer der Philosophie in Athen. Er geht auch von dem Nebelball aus, läßt diesen aber in starke Rotation kommen und durch die Zentrifugalkraft werden aus dem rotierenden Nebel die Himmelskörper ausgeschieden[4]) als einzelne Kugeln. Er sagt ausdrücklich, daß die Geschwindigkeit der Rotation viel größer sei, als irgendeine durch Menschen hergestellte Rotation. Seine Idee von der Abschleuderung der Kugeln ist zweifellos glücklicher als die Idee Laplaces über die Absonderung von Ringen. Diese gelingt bei dem Plateauschen Versuch nur, wenn man die schnelle Rotation plötzlich etwas verlangsamt. Anaxagoras ist aber auch der Vater der Atomistik. Die ganze Materie ist in kleinste, nicht weiter teilbare Atome zerlegbar, die verschieden schwer sind und daher bei jener Rotation durch diese Verschiedenheit zur Ablösung einzelner Kugeln führen. Er erklärt denn auch un-

---

[1]) Achilles 133 A.
[2]) Diels, Vorsokrat. I, p. 200, Fr. 100.
[3]) Hippolytos, Philos. 7, 7.
[4]) Simplicius, De coelo 35, 13.

zweideutig, daß die Luft schwer ist, daß es also nicht absolut schwere und absolut leichte Materie gibt.[1]) Man kann Anaxagoras auch als Vorläufer von Kepler und Newton ansehen; er sagt: Da Mond und Sterne ebenfalls schwer sind, würden sie auf die Erde fallen, wenn nicht die Zentrifugalkraft sie daran hinderte.[2]) Ein Ausspruch, der in bezug auf den Mond bei Kepler in der Astron. nova, B. V, und bei Newton im 3. Buch seiner Principia wiederkehrt! Ist es nun möglich, anzunehmen, daß Anaxagoras solche Ansicht haben konnte ohne experimentelle Erfahrung über die Zentrifugalkraft?

Gewöhnlich wird als Vater der Atomistik Demokrit genannt, z. B. bei Auerbach (Entwicklungsgeschichte, p. 19). Das kommt wohl daher, daß die meisten Schriftsteller über Atomistik sich nicht mit den Originalfragmenten, sondern mit der Darstellung des Lucrez, eines lateinischen Dichters, beschäftigt haben. Demokrit von Abdera (460—370) war ein Schüler von Leukippos und hat dessen Atome in seine Kosmog nie übernommen, aber diese Kosmogonie ist sehr viel unklarer und unverständiger als die des Anaxagoras. Der unendliche Raum ist mit verschieden schweren Atomen erfüllt, die alle eine gleichgerichtete Bewegung nach unten[3]) haben. Da die schwereren schneller fallen, stoßen sie auf die leichteren, dadurch entstehen Wirbel, in diesen bilden die gleichartigen neue Körper, die leichteren werden in die Höhe gedrückt und bilden eine kugelförmige Hülle.[4]) Die Erde im Mittelpunkt der Welt wird von der Luft getragen.[5]) Die übrigen Himmelskörper bewegen sich um die als flache Walze gedachte Erde und sind durch d n schnelleren Umschwung glühend geworden.[6]) Wir sehen, daß diese Vorstellungen erheblich unklarer sind als die von Anaxagoras, und werden Platon recht geben, wenn er diese Kosmog nie ablehnt, weil es kein unten und oben im Raume geben könne.[7]) Das einzig Gute an Demokrits Weltansicht ist, daß er sagt, jede Bewegung hat eine natürliche Ursache und die Entwicklung vollzieht sich nach dem Gesetz der Kausalität. Er ist damit der erste, der den Satz vom zureichenden Grunde aufstellt (cf. Aristoteles, l. c.).

---

[1]) Aristoteles, De coelo IV, 4; Prob. 35, 13.
[2]) Plutarch, Lysias 12.
[3]) Aristoteles, De coelo 4, 2, 309a und b. Simplicius, Comm. 569, 5; 712, 27.
[4]) Diogenes IX, 32.
[5]) Aristoteles, De coelo 4, 6.
[6]) Aetius, Placita II, 15.
[7]) Platon, Timaios 62.

2. Periode.

Mit Platon beginnen wir die zweite Periode, weil wir jetzt über die Leistungen der Forscher aus ihren uns erhaltenen Werken orientiert werden, wenn auch bedauerlich bleibt, daß uns selbst von den Bedeutendsten nicht alles erhalten ist und oft gerade die wichtigsten Schriften verloren gegangen sind, nämlich diejenigen, welche den Zeitgenossen und Nachfolgern schwer verständlich waren, weil sie sich über den allgemeinen Bildungsstand weit herausheben. Von nun an können wir darum auch die einzelnen Gebiete der Physik gesondert behandeln und den verschiedenen Problemen nachgehen.

Platon (429—348) hatte schon im Symposion die Kugelgestalt der Erde, der Sonne und des Mondes als ganz allgemein bekannt erwähnt[1]); er kommt im Phädon (47) noch einmal darauf zurück. Zwischen den Himmelskörpern gibt es keinen leeren Raum, vielmehr ist die Luft bestrebt, die leeren Räume alsbald auszufüllen. Wenn das Feuer wegen seines geringeren Gewichts in die Höhe steigt, so wird seine Stelle sofort durch Luft ersetzt. Ebenso wenn die Lunge den Atem herausdrückt gegen die Luft, so tritt diese an die Stelle und dringt durch ihren Druck in die Lunge ein[2]); auch durch die Poren der Haut dringt die Luft in den Körper.[3]) Man hat, weil Platon die Existenz des leeren Raumes in der Natur leugnet, ihm vorgeworfen, er habe Materie und Raum identifiziert. Das ist nicht richtig; Platon sagt ausdrücklich, daß der Raum von der ihn füllenden Materie unterschieden werden müßte.[4]) Er kennt daher auch die Möglichkeit, künstlich leere Räume herzustellen[5]), nur in der freien Natur kommen solche leeren Räume nicht vor. Auch die Lufthülle der Erde grenzt nicht an einen leeren Raum, sondern dann folgt die reinste Luft, d. h. der Äther[6]), welcher den Raum zwischen den Himmelskörpern füllt. Dies Weltall können wir kugelförmig denken, in ihm gibt es kein oben und unten, man kann es nicht in zwei solche Teile zerlegen; will man von einem Oben und Unten sprechen, so kann das nur folgenden Sinn haben: Wenn man an einem Orte, wohin das Feuer aufsteigt, eine Wagschale mit zwei ungleichen Maßen belastet, so ist die Richtung, nach welcher die Schale mit dem kleineren Gewicht bewegt wird,

[1]) Symposion 190.
[2]) Timaios 59.
[3]) ib. 79b.
[4]) ib. 54e.
[5]) ib. 179, 182, 205.
[6]) Phaidon 109—111 u. Kratylos 410.

die Richtung nach oben, die mit dem größeren Gewicht gibt die Richtung nach unten an.[1]) Ein Körper, der in der Mitte dieses Weltalls ruht, bedarf keines Trägers, er ist von selbst im Gleichgewicht[2]), und ein um diese Mitte rotierender Körper ist nicht oben oder unten, sondern nimmt alle Lagen (für den Beschauer) nacheinander an. Die Körper unterscheiden sich nach dem Gewicht, und die Lehre vom größeren und kleineren Gewicht nennt er Statik.[3])

Über die Änderung des Aggregatzustandes spricht Platon sich auch aus. Wenn das Wasser mit Feuer (Wärme) vermischt wird, so steigt es auf, wie wenn die Sonne feuchtes Erdreich bescheint. Dann aber drückt der Luftdruck die vorher feuchte Erde zusammen und sie wird hart.[4])

Auch die Kapillarität ist Platon bekannt. Er erwähnt das Experiment, daß das Wasser aus einem gefüllten Becher durch einen hineinhängenden Wollfaden in einen leeren Becher überfließt.[5])

In bezug auf die Kinematik unterscheidet Platon fortschreitende und rotierende Bewegung. Sind beide gleichzeitig an einem Körper vorhanden, dann entsteht die rollende Bewegung. Bei der rotierenden Bewegung unterscheidet er Winkelgeschwindigkeit und lineare Geschwindigkeit. Werden große und kleine konaxiale Kreisebenen gleich schnell herumgedreht, so hat der größere Kreis am Umfange größere lineare Geschwindigkeit.[6]) Bei der Kreiselbewegung erkennt er das Gesetz von der Erhaltung der Rotationsebene.[7]) Es muß auch noch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß Platon wiederholt zu experimenteller Forschung auffordert, der er entscheidende Bedeutung beilegt.[8]) In bezug auf die bei den Vorgängern so in dem Vordergrund des Interesses stehende Kosmog nie sei kurz erwähnt, daß Platon im Timaios die Achsendrehung der Erde lehrt und in den Gesetzen das heliozentrische System vertritt, wie ich an anderer Stelle ausführlich bewiesen habe.[9]) Es muß immer beachtet werden, daß Platon kein einziges naturwissenschaftliches Werk geschrieben hat, auch der Timaios kann nicht so gewertet werden; er hat also weder

---

[1]) Timaios 58.
[2]) Phaidon, l. c.
[3]) Charmides 166.
[4]) Timaios 60b.
[5]) Sympos. 175.
[6]) Gesetze 893b.
[7]) Staat V, 418.
[8]) Staat V, 635; Philebos IV, 752; Euthyphron V, 202.
[9]) Archiv für d. Gesch. d. Naturw. V, p. 81ff., 1913.

ein Lehrbuch noch ein System hinterlassen. Aber seine gelegentlichen Äußerungen konnten als gute Grundlagen weiterer Forschung dienen und haben tatsächlich mehrere Jahrhunderte dazu angeregt, wie wir noch sehen werden. Für die spätere Zeit und für das ganze Mittelalter sind sie aber zurückgedrängt durch die Schriften seines einstigen Schülers Aristoteles, der verhängnisvoll gewirkt hat durch die Autorität, welche ihm von den Gelehrten der ersten 1000 Jahre unserer Zeitrechnung mehr und mehr zugestanden wurde.

Aristoteles (Stageiros, 384—322) hat in seinen acht Büchern über Physik, vier Büchern über den Himmel, zwei Büchern über Entstehen und Vergehen, vier Büchern Meteorologie, Mechanik und Probleme ein System der Naturforschung, verbunden mit einer Enzyklopädie geliefert, neben den rein philosophischen und naturbeschreibenden Werken. Uns interessiert hier nur das auf Mechanik Bezügliche, und auch dies nur, soweit es einen Fortschritt oder ein Hemmnis für den Fortschritt darstellt. Da ist zunächst festzustellen in bezug auf die Bewegung[1]), daß er unter Bewegung den Übergang von potentieller in aktuelle Existenz sieht. Derartige inhaltlose Erklärungen gibt es viele. Er lehnt den Atomismus sehr entschieden ab und leugnet die Möglichkeit eines leeren Raumes. Die Zeit ist nur das Maß der Bewegung, ohne selbständige Bedeutung. Von den Eleaten übernimmt er die Behauptung, daß jeder Körper seinen natürlichen Ort im Weltall hat; bewegt er sich dahin, so ist das seine natürliche Bewegung, wozu es keiner treibenden Kraft bedarf. Jede andere Bewegung ist erzwungen. Mit diesen Voraussetzungen wagt sich Aristoteles an den schiefen Wurf.[2]) Die Wurfbahn zerfällt in drei Teile: Erst die erzwungene Bewegung, dann die gemischte und drittens die natürliche. Nachdem die Berührung des Geschosses durch den stoßenden Körper aufgehört hat, treibt die nachdringende Luft das Geschoß weiter, bis die Kraft aufgebraucht ist. So entsteht die dreiteilige Wurfbahn: der gekrümmte Aufstieg, die horizontale Mischlage und der gekrümmte Abfall; und diese Theorie hat bis 1537, bis zu Tartaglias nuova Szienza, geherrscht (!!), der dann zuerst nachwies, daß die ganze Bahn gekrümmt sei, und erst Galilei leitete die Parabelwurfbahn ab. Aber Aristoteles findet bei dieser Gelegenheit das Beharrungsgesetz (l. c. 4, 8; 5, 3; 8, 7): „Ferner könnte wohl niemand angeben, warum etwas einmal in Bewegung Gesetztes irgendwo stille

---

[1]) Physik, Buch 3.
[2]) ib., Buch 4.

stehen solle; denn warum mehr hier als dort? Demnach muß es entweder ruhen oder ins Unbegrenzte fort räumlich bewegt werden, falls nicht ein Stärkeres es hindert." In der natürlichen Bewegung kommt eine gleichförmige Beschleunigung zustande, in der gewaltsamen gleichförmig verzögerte.[1]) Aber Aristoteles denkt dabei nicht an den Widerstand, sondern an eine neue Kraft. Da er die Atomistik grundsätzlich ablehnt, nicht nur die Demokritische, so faßt er die gesamte Natur als ein Kontinuum auf und definiert die Kontinuität im sechsten Buche als den Zustand, bei welchem die Grenzen je zweier benachbarten Teile zusammenfallen (σύνεχες). Verdienstvoll ist, daß er das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten bei Behandlung des Hebels für diesen Fall richtig ausspricht[2]): „Wenn A das Bewegende (die Kraft), B das Bewegte, G die Länge, durch welche es bewegt wird, D die Zeit ist, so wird A in der gleichen Zeit $B/2$ um $2G$, aber in $D/2$ um G bewegen," oder kürzer: Kräfte wirken gleich viel, wenn sie sich umgekehrt verhalten wie die Geschwindigkeiten. Da Aristoteles diesen Satz allgemein gültig anwenden will, ist er so nicht richtig, da er das Beharrungsvermögen nicht beachtet. Die vollständige, allgemeingültige Fassung dieses Prinzips gibt erst Lagrange in seiner mécanique analytique 1788: „Wenn ein beliebiges System von beliebig vielen Körpern oder Punkten, deren jeder durch beliebige Kräfte angegriffen wird, im Gleichgewicht ist, und man diesem System eine beliebige kleine Bewegung erteilt, infolge deren ein jeder Punkt eine unendlich kleine Strecke durchläuft, so ist die Summe aller Kräfte, jede multipliziert mit der Strecke, welche der Punkt, an dem sie wirkt, in der Richtung dieser Kraft durchläuft, $= 0$. D. h. $\Sigma K_i \,.\, ds_i = 0$ $(i = 1$ bis $n)$."

Bei der Anwendung dieses Prinzips auf den Hebel wirft Aristoteles die Frage auf: Warum wiegt ein langer Wagebalken genauer als ein kurzer? Und antwortet: Weil das kleine Gewicht in gleicher Zeit einen größeren Bogen zurücklegt. Bei dieser Frage zerlegt er die Bewegung in radiale und tangentiale Komponenten; das ist das erste Beispiel für das Parallelogramm der Bewegungen.[3]) Das führt ihn in dem 21. Satze zum Prinzip der Schnellwage. Daß Aristoteles trotzdem über die Bedeutung des Hebels nicht klar ist, beweist sein Versuch, die Wirkung des Keils durch Hebel zu erklären (Satz 18). Um nicht wieder auf Aristoteles zurückkommen zu müssen, will ich die Weiterbildung des Hebelgesetzes

[1]) Physik, Buch 5.
[2]) Physik, Buch 7.
[3]) Mechanische Probleme, Satz 1 u. 2.

jetzt unterbrechen und noch einige Bemerkungen des *Aristoteles* erwähnen, die für die weitere Entwicklung der Mechanik von Bedeutung waren.

Im Problem 32 beschreibt er die *Taucherglocke*, ohne sie richtig zu erklären; ebensowenig versteht er das von ihm erwähnte Experiment[1]) des im Kreise geschwungenen, mit Wasser gefüllten Bechers. Man hat ihm auch die Entdeckung der Osmose zugeschrieben. Er erwähnt nämlich das von *Demokrit* schon gegebene Experiment, daß an der Außenwand alter Tonkrüge, wenn man sie mit Meerwasser füllt, süßes Wasser herabläuft. Bei genauer Untersuchung hätte er feststellen können, daß dies Experiment nur gelingt, wenn man Tonkrüge nimmt, die einige Zeit zur Aufbewahrung süßen Wassers benutzt wurden, so daß die Tonmasse noch süßes Wasser enthielt, welches nun durch den Druck des Meerwassers herausgepreßt wird. Ebenso hat man *Aristoteles* die Idee der kinetischen Energie zuschreiben wollen, weil er die Frage stellt[2]): Warum spaltet die ruhende *Axt* trotz schwerer Belastung das Holz nicht, wohl aber, wenn sie mäßig bewegt wird? Aber seine Antwort findet den Arbeitsbegriff nicht. — Einen sehr üblen Dienst hat *Aristoteles* der Physik durch Einführung der quinta essentia, des Äthers, getan.[3]) Dies fünfte Element soll weder schwer noch leicht sein, daher nicht, wie die anderen vier Elemente, auf und ab steigende Bewegung haben, sondern nur rotierende. Glücklicher ist er in der Erklärung des *Rauhreifs*[4]), die im wesentlichen richtig ist. Auch die Beobachtung, daß Wasser *komprimierbar* ist, muß als positive Leistung erwähnt werden.) Endlich erkennen wir gern an, daß er die Meinung der Pythagoreer und *Platons* übernimmt, daß alle Wirkungen der Körper aufeinander nur durch *Kontakt* möglich sind.[6])

Eine der Aristotelischen Aporien[7]) hat verschiedene Mathematiker und Physiker bis in das 19. Jahrhundert beschäftigt; sie ahnten nicht, daß sie bereits im Altertum ihre richtige Lösung fand. *Aristoteles* stellt folgendes mechanische Problem: Auf einer Achse ist ein Doppelrad drehbar, dessen größerer Radius etwa doppelt so groß als der des kleinen Rades ist; läßt man nun beide Radperipherien auf ebenen Unterlagen laufen, so muß das größere Rad

---

[1]) De coelo, Buch 2.
[2]) Mechanische Probleme, S. 20.
[3]) De coelo, Buch 1; Phys. IV, 5; Meteor. I, 4.
[4]) Meteor. I, 9; II, 17.
[5]) ib. IV, 17 u. 18.
[6]) Entstehen u. Verg. II, 6 u. 7.
[7]) Mechanische Probleme 25.

eine doppelt so große Strecke zurücklegen als das kleine bei einer Umdrehung des Rades. Da die beiden Unterlagen aber parallele Gerade sind und der Mittelpunkt stets in der Senkrechten in dem Berührungspunkt liegt, müßte er also sowohl die einfache wie die doppelte Strecke durchlaufen. Diese Aporie sieht ganz so aus, als ob sie von den Eleaten stammte. Aristoteles konnte sie nicht lösen. Aber Heron von Alexandrien[1]) hat sie richtig gelöst. Das Abrollen des Rades ist nur möglich, wenn einer der beiden Radreifen teilweise auf seiner Unterlage schleift, und zwar, wenn der kleinere Radreifen vollständig rollt, muß der größere eine rückwärtige Schleifbewegung bei seiner Drehung vollführen, und wenn der größere wirklich abrollt, wird der kleinere um die Differenz der Peripherien nach vorn mitgeschleift.

Aristoteles ist trotz der Fülle seiner Schriften für die Naturforscher der nächsten 250 Jahre ohne Einfluß geblieben, sie sind vielmehr den Ideen Platons und seiner Schule gefolgt. In erster Linie war es Archimedes (Syracus, ca. 288, † 212), der die Mechanik förderte. Leider ist uns das Werk, welches die wesentlichste Grundlage für die weiteren Arbeiten bildete, *περὶ ζυγῶν*, über die Wagen, verloren gegangen, und nur aus späteren Zitaten wissen wir, daß in dieser Schrift die grundlegenden Ansichten über Schwerpunkt und Hebelarm ausgesprochen waren.[2]) Er selbst zitiert daraus den Satz, daß der Schwerpunkt zweier Massen auf der Verbindungslinie ihrer Schwerpunkte liege.[3]) Den Schwerpunktsbegriff benutzt Archimedes auch bei Ableitung des Hebelgesetzes in der Mechanik. Die Ableitungen dieses Werkes ruhen auf sieben Voraussetzungen, deren erste lautet: Gleiche Gewichte in gleichen Entfernungen vom Drehpunkt aufgehängt, sind im Gleichgewicht. Mit Hilfe dieser Voraussetzung führt er in Satz 6 und 7 für den kommensurablen und inkommensurablen Fall die Behauptung[4]), daß zwei Größen sich im Gleichgewicht befinden, wenn ihre Abstände vom Drehpunkt umgekehrt proportional den Gewichten sind, zurück auf eine Verteilung von Masseneinheiten auf den Hebelarm, so daß je zwei gleich weit vom Drehpunkt entfernte Punkte gleiche Massen haben, so daß für solche Paare der Schwerpunkt im Drehpunkt liegt, also Gleichgewicht vorhanden ist.

---

[1]) Heron, Mechanik c. 7, p. 16 der opera omn. II, 9, 1900.
[2]) Pappos III, 1060; Plutarch, Marcellus 14—19; Polybios VIII, 5—9.
[3]) Mechanik, in Opera omnia II (Heiberg) als Gleichgewicht von Ebene I bezeichnet, Satz 4, p. 128.
[4]) l. c. 132ff.

Gegen diese Ableitung hat Mach und seine Nachfolger eingewandt, sie benutze schon die Kenntnis, daß das Produkt aus Kraft mal Hebelarm die Wirkung bestimme. Der Vorwurf ist ungerecht, da in der angegebenen ersten Voraussetzung dies ja ausdrücklich ausgesprochen war und die Ableitung dieses Satzes in dem verlorenen Werke über den Wagebalken, wie aus den zitierten klassischen Zeugen hervorgeht, schon gegeben war. In diesem Werke kam auch der berühmte Satz vor: *δός μοι, ποῦ στῶ, καὶ κινῶ τὴν γῆν.*[1]) (Gib mir einen Ort, wo ich stehen kann, und ich werde die Erde bewegen.)

Auch die Bemerkung Machs, daß Leonardo da Vinci (1452 bis 1519) der erste gewesen sei, der die Wichtigkeit des Begriffes des statischen Momentes erkannt habe, indem er den potentiellen Hebel (soll Hebelarm heißen) eingeführt habe, ist nicht richtig. Zunächst hat Archimedes das statische Moment in seinem Buche über die Parabelquadratur und in der *ἔφοδος* ganz ausgiebig benutzt, dann hat Heron[2]) den potentiellen Hebelarm, nämlich das Lot vom Unterstützungspunkt auf die Kraftrichtung sowohl bei einem geneigt stehenden Hebel wie bei der Rolle mit angehängten Gewichten eingeführt, und spricht die Bedingung des Gleichgewichtes in der Form des Produktes aus Kraft mal Abstand ganz konsequent aus. Es ist darum kein Wunder, daß der arabische Gelehrte Al Ansârî, der Herons Werk kannte, ebenfalls den Abstand als potenziellen Hebelarm gebraucht.[3]) Es ist außerdem sehr wahrscheinlich, daß Leonardo da Vinci ebenfalls Herons Mechanik durch die Araber kannte, denn um jene Zeit war in Italien diese Literatur sehr verbreitet, wie wir später noch sehen werden. Endlich ist die von Jordanus Nemorarius († 1236) eingeführte gravitas secundum situs, die er beim geneigten Hebelarm gebraucht, nichts anderes als das statische Moment Herons. Auch der bisweilen als Erfinder des statischen Momentes genannte Guido Ubaldi (1545—1607) hat sein Experiment genau nach Herons Vorbild eingerichtet und behandelt.[4]) Der Begriff des statischen Moments gehört also, wenn man Archimedes wegen des verlorenen Werkes nicht anerkennen will, in seiner vollständigen Fassung sicher Heron an.

---

[1]) Plutarch, l. c.
[2]) Heron, Opera omn. II, 1, p. 88 u. 90.
[3]) E. Wiedemann, Sitzungsbericht d. phys.-mediz. Soc. in Erlangen, Bd. 37, p. 405, 1905.
[4]) Ubaldi, Mechanicorum liber, p. 106, Pisa 1577.

Die Versuche von Galilei, Stevin, Huygens und Lagrange, den Archimedesschen Beweis erkenntnistheoretisch zu verbessern, müssen als ergebnislos bezeichnet werden; denn sie kommen alle wieder darauf hinaus, den Schwerpunkt zu benutzen; aber bei der Bestimmung des Schwerpunkts wird das Prinzip des statischen Moments schon vorausgesetzt, indem die Koordinaten des Schwerpunktes

$$\xi = \frac{\Sigma mx}{\Sigma m} \quad \text{und} \quad \eta = \frac{\Sigma my}{\Sigma m}$$

in einer Ebene dies Produkt ja schon anwenden. Eine a priori-Erkenntnis ist also nicht ableitbar und es bleibt nur die Erfahrungstatsache, wie sie bei Archimedes in der Voraussetzung 1 ausgesprochen ist, als Beweismoment übrig.

In den uns erhaltenen Schriften des Archimedes kommt nichts von Phoronomie und Dynamik vor. Ob die von verschiedenen, besonders arabischen Schriftstellern ihm zugeschriebenen Erfindungen wirklich von ihm sind, kann z. Z. schwerlich ermittelt werden; ich lasse es also dahingestellt sein, ob er z. B. auch den Wurf und den Fall behandelt hat.

Dagegen hat uns Archimedes in seinem *περὶ ὀχουμένων* (über schwimmende Körper) die Grundlage der Hydrostatik gegeben. Das Postulat, von dem er ausgeht, lautet: Die Flüssigkeit habe die Natur, daß, weil ihre Teile alle gleichmäßig und kontinuierlich liegen, der weniger gedrückte Teil von dem stärker gedrückten verdrängt wird und jeder Teil von dem darüber liegenden gedrückt wird, wenn nicht die Flüssigkeit eingeschlossen ist und anderweit gedrückt wird.[1]) Damit beweist Archimedes zunächst, daß jede freie Flüssigkeit eine sphärische Oberfläche haben muß, deren Mittelpunkt der Erdmittelpunkt ist. Satz 5 lautet: Ein Körper, der leichter ist als die Flüssigkeit, taucht so tief ein, daß das Gewicht des Körpers gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit ist. Satz 6: Wird ein solcher leichterer Körper gewaltsam in die Flüssigkeit gedrückt, so wird er durch eine Kraft aufwärts getrieben $= H - P$, wenn P das Gewicht des Körpers, H das der verdrängten Flüssigkeit ist. Satz 7: Ein Körper, der schwerer als die Flüssigkeit ist, sinkt bis auf den Grund und ist, in der Flüssigkeit gewogen, um das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit leichter geworden. Dann behandelt er schwimmende Kugel-

---

[1]) Opera omn. II. p. 318.

segmente in bezug auf ihre Stabilität. Im 2. Buche[1]) handelt er von schwimmenden parabolischen Konoiden, da er das Metazentrum noch nicht kennt, welches erst von Stevin († 1620) in seinen posthum herausgegebenen Opera (Traité des acrobatiques, II, 1634, p. 512) eingeführt ist, muß er die verschiedenen einzelnen Fälle ziemlich mühsam durch Proportionen behandeln und kommt in den letzten Aufgaben des Buches der Betrachtung mit Hilfe des Metazentrums sehr nahe, um die Unterscheidung, ob stabiles oder labiles Gleichgewicht besteht, herbeizuführen.

Nun ist uns außer diesen in den vorhandenen Schriften nachweisbaren Leistungen doch noch aus späteren Zitaten einiges benannt als von Archimedes erfunden. Um das Jahr 500 n. Chr. erscheint ein Gedicht: De ponderibus et mensuris[2]), welches in Übereinstimmung mit dem Rhemmius Fannius Palaemon (1. Jahrh. n. Chr.) zugeschriebenen von einem Aräometer des Archimedes erzählt. Diese aus Silberblech hergestellte Senkwage wird auch in einem Briefe des Synesios (410 n. Chr.) an Hypatia erwähnt[3]) und nach dem Zeugnis Al Khazinis[4]) soll die Beschreibung auf Pappos zurückgehen. Danach ist Archimedes also auch ein Vorerfinder der Nicholsonschen Senkwage 1787. Außerdem werden der Potentialflaschenzug, die Schraube ohne Ende, Zahnräderübertragungen und manches andere in arabischen Schriften mit Archimedes' Namen in Verbindung gebracht, ohne daß wir wirkliche Quellen und zuverlässige Angaben darüber namhaft machen könnten.

Archimedes' Mechanik hatte einen außerordentlichen Erfolg. Er selbst hatte in Alexandria studiert und mit Alexandrinischen Gelehrten Freundschaft und wissenschaftlichen Verkehr gepflogen, nach seinem Tode blühte nun in Alexandria eine Mechanikerschule auf, von der drei Namen, Ktesibios, Philo und Heron, nacheinander genannt werden. Diese historische Anordnung ist gleichzeitig eine qualitative Komparation. Von Ktesibios (ca. 200—180) ist uns nur durch Vitruv[5]) einiges bekannt. Es sind die Erfindungen der Druckpumpe, der Feuerspritze, der Wasserorgel mit Klaviatur und Wasseruhren. Ob Ktesibios nur praktischer Mechaniker war oder auch wissenschaftliche Begründung für seine

---

[1]) l. c., p. 348.
[2]) Hultsch, Metrol. scrip. II, 95.
[3]) Hofmann, Berichte d. Wiener Acad. 163, p. 18 u. 20, 1909.
[4]) Wage der Weisheit, Journ. of the americ. orient. soc., Bd. 6, p. 1, 1859.
[5]) Vitruv, architect. IX, 8, und X, 7 u. 8.

Apparate gab, wissen wir nicht. Da Vitruv ein banausischer Kompilator war, bedeutet das Schweigen desselben nichts. Eine Pumpmaschine nach den Angaben des Ktesibios ist 1795 in Chiarussio bei Civita Vecchia ausgegraben.

Von Philo (ca. 170 n. Chr.) ist uns ein geringer Teil seiner *μηχανικὴ σύνταξις* und in arabischer bzw. lateinischer Übersetzung auch etwas von seiner Pneumatik erhalten.[1]) Er machte ebenfalls Apparate wie Ktesibios und sucht sie zu erklären. Da er dabei meist auf Aristotelische Gedanken zurückgreift, gelingt ihm das nur selten. Richtig ist sein Nachweis, daß die Luft ein Körper ist, durch seinen Versuch mit dem in Wasser getauchten Rezipienten, ebenso der später so genannte Heronsball. Bei den Pumpen meint er nach Aristotelischer Anleitung, daß das Wasser an der Luft hafte; ebenso sind seine Erklärungen für die Herstellung eines konstant hohen Wasserspiegels, der Öllampe mit konstantem Niveau, des Stechhebers unzulänglich. Dagegen ist sein Thermoskop richtig verstanden (s. d. Abschn. über die Wärme).

Auf sehr viel höherer Stufe steht Heron[2]), dessen Schriften zum Teil vor 133, zum Teil nach 133 geschrieben sind. Da in neuester Zeit wieder Stimmen laut geworden sind, die versuchen, Heron in das dritte Säkulum nach Christum zu verweisen, z. B. Heath in seiner History of Greek Mathem., ist es doch nötig, auf die Tatsachen hinzuweisen, die unwiderlegt feststehen, gegenüber jenen vagen Spekulationen. Ich habe[3]) nachgewiesen, daß die unter Herons Namen aufgeführten mathematischen Schriften: Definitionen, Geometrie und Stereometrie, mit Heron von Alexandrien nichts zu tun haben, sondern elende Kompilationen, aus verschiedenen Quellen etwa im siebenten oder achten Säkulum zusammen geschrieben, sind. Damit entfallen alle Gründe, welche aus diesen Schriften für eine so späte Ansetzung gezogen sind. Ich habe ferner nachgewiesen, daß die Gründe, welche aus Plinius' Erwähnung der Schraubenpresse gezogen sind, hinfallen, weil Plinius' Angaben nach dem Bericht Vitruvs falsch sind.[4]) Ich habe drittens nachgewiesen, daß Vitruv von Heron abgeschrieben hat.[5]) Ich habe

---

[1]) Val. Rose, Anecdota graeca II, p. 299ff., und Herons Opera omn. I, p. 458.

[2]) Herons Lebenszeit s. Hoppe, Ein Beitrag z. Zeitbestimmung Herons, Hamburg 1902 und Mathem. u. Astron. im klass. Altertum, 1911, p. 335.

[3]) Philologus 75, p. 202, 1918.

[4]) Ein Beitrag zur Zeitbestimmung Herons von Alexandrien. Progr. Hamburg 1902, p. 2.

[5]) Ebenda p. 4.

viertens[1]) nachgewiesen, daß Heron nur Posidonios Alexandrinus, der vor Archimedes gelebt hat, aber nicht den berühmten Rhodier gekannt hat, und endlich habe ich gezeigt[2]), daß ein Teil der Werke Herons vor 133, dem Jahre, in welchem etwa durch Hipparch die Kreiseinteilung in 360⁰ von Babylon nach Griechenland gebracht war, geschrieben sind, weil er darin noch nach der alten Weise die Winkel in Bruchteilen von einem rechten angibt, und die Dioptra, vielleicht auch die Metrik nach dieser Zeit geschrieben sind, da sie die neue Einteilung gebrauchen. Diese Tatsachen weisen Heron in die Zeit zwischen 150—100 v. Chr. Zu dieser Zeitangabe stimmen sämtliche Zitate, die Heron gibt, stimmt der Inhalt seiner wirklichen Werke vollkommen, stimmen alle Zitate, die über Heron von den späteren Schriftstellern gebracht sind. Er steht ganz auf Archimedes' Schultern und zitiert ihn sehr oft. Heron war in Alexandria Vorsteher einer Schule, aber nicht einer Philosophenschule, sondern eines Polytechnikums[3]), welches hier zum ersten Male in der Geschichte der Wissenschaft auftritt. Der Unterricht wurde in zwei Abteilungen gegeben, die erste war das *λογικόν* und umfaßte Geometrie, Arithmetik, Astronomie und Physik, die zweite war das *χειρουργικόν*, sie enthielt: Metallbearbeitung, Maschinen, Baukunst, Holzbearbeitung, Malerei. In die zweite Abteilung kamen nur die, welche die logistische Bildung besaßen. Heron schrieb für seine Schüler.[4]) Er ist der erste, welcher seine Quellen gewissenhaft zitiert, unter ihnen in erster Linie Archimedes und Philon. In der Einleitung zur Pneumatik wählt er unter den verschiedenen philosophischen Anschauungen über das Vakuum die Stratons, welche mit Platon viele Berührungspunkte gemeinsam hat.

Es gibt in der Natur kein absolutes, kontinuierliches Vakuum[5]), nur zwischen den Molekülen der Körper kann es solche kleine leeren Räume geben. Die Luft ist ein Körper von hoher Elastizität, sie übt einen Druck aus, man kann künstlich luftleere Räume herstellen. So erklärt er den Saug- und Stechheber richtig, ebenso die Flasche mit konstantem Wasserausfluß, die intermittierenden Ausflüsse (Quellen). Die Ausdehnung der Luft bei Erwärmung gibt die richtige Erklärung der Schröpfköpfe; er benutzt dieselbe zu einer Art Heißluftmaschine, um Wasser in die Höhe zu drücken.

---

[1]) Ebenda p. 6.
[2]) Mathematik und Astronomie im klassischen Altertum, 1911, p. 337.
[3]) Pappos III, 1022.
[4]) Heron, Mechanik, Opera omn. II 1, 70.
[5]) Pneumatik., Opera omn. I, p. 1ff.

Ausgedehnte Anwendung des hydrostatischen Druckes, Bodendruck und Seitendruck kennt er. Die Verdampfung des Wassers und die Spannkraft des Wasserdampfes führt zur Konstruktion der Aeolipile und zur Darstellung des tanzenden Balles auf dem Dampfstrahl. Er ist auch der erste, der Quecksilber[1]) statt Wasser für Druckkräfte empfiehlt wegen des großen spezifischen Gewichtes und der Wärmeausdehnung. Sein Thermoskop (Luftthermometer, p. 225) dient zu meteorologischen Beobachtungen. In der Mechanik[2]) ist zunächst durch Räderwerk die Archimedessche Aufgabe gelöst, durch 5 Talente 1000 zu heben. Dann führt er das Parallelogramm der Geschwindigkeiten (p. 181) und (l. c., p. 90) auch das der Kräfte ein, er behandelt auch die schiefe Ebene (p. 60), führt die experimentelle Bestimmung des Schwerpunktes aus, löst die Aristotelische Aufgabe über die Lastverteilung bei zwei und mehreren Stützen, welche schon von Archimedes behandelt war. Den ausgiebigsten Gebrauch macht er vom Hebel und spricht das Gesetz stets in Form der statischen Momente aus. Er wendet für Maschinen Friktionsräder an, beschreibt die Konstruktion und Wirkungsweise der Schrauben, auch der Schrauben ohne Ende, behandelt die Hebel- und Schraubenpresse, erfindet die Berg- und Seilbahn (ib. 220). Aber durch alle diese Vorrichtungen kann an Arbeit nichts gewonnen werden, denn was an Kraft gewonnen wird, geht an Zeit verloren (ib. 158). Das zeigt er besonders am Potenzflaschenzug und der Zahnradübertragung. Auch das Beharrungsgesetz spricht er für die gleichförmige Bewegung aus[3]) und findet die Kraft proportional der durch sie verursachten Geschwindigkeit (Beschleunigung.[4])

Eine ganz hervorragende Leistung ist sein Diopter[5]), welches er sowohl für geodätische wie astronomische Messungen einrichtete. Nach dem Urteil Repsolds[6]) ist es in den Jahrhunderten bis zu dem Instrument des Landgrafen von Hessen, Wilhelm IV., 1560, durch kein astronomisches Instrument erreicht. Als Nivellierinstrument war es mit einer 1,8 m langen Wasserwage ausgerüstet, die für astronomische Zwecke abgeschraubt wurde. Alle Feineinstellungen wurden durch Mikrometerschrauben, alle Dre-

---

[1]) l. c., p. 179.
[2]) Opera omn. II 1, p. 1.
[3]) Pneumatik., Opera omn. I, p. 14.
[4]) Mechanik, p. 170.
[5]) Opera omn. III 1, 188.
[6]) Astronom. Nachrichten Nr. 4931, März 1918, p. 97.

hungen durch Schrauben ohne Ende und Zahnräder gemacht. Auch die zentrischen Fehler wurden durch doppelte Ablesung an der in 360° geteilten Alhidade ausgeglichen. Bei den Anwendungen dieses Diopters löst er die Meßtischaufgabe, konsturiert Kurven in der Ebene und Wölbungen mit Hilfe der Perspektive, gibt eine vollständige Anleitung zum Tunnelbau mit Schachtanlagen und zeigt, wie das Instrument für astronomische Höhen- und Distanzmessungen gebraucht werden muß. In der Ergänzung zu dem Diopter[1]) beschreibt er den Wegemesser, das Taxameter mit sichtbarem Zeigerblatt und die Methode, durch Beobachtung von Mondfinsternissen die Längenunterschiede zweier Orte auf der Erde zu bestimmen.

Ich übergehe die Metrik Herons, da sie wesentlich mathematisches Interesse hat, obwohl sie für viele Jahrhunderte das maßgebende Lehrbuch war. Ebenso bedarf sein Werk über Automaten keiner Inhaltsangabe, da es nur Anwendungen der im vorstehenden geschilderten physikalischen Erkenntnisse bietet und nichts Neues enthält. Mit Heron schließt die Mechanik ab für mehrere Jahrhunderte. Die römischen Legionen haben der griechischen Wissenschaft im allgemeinen und der Mechanik im besonderen den Garaus gemacht. Aber Heron ist wegen seiner technischen Leistungen als Lehrer der Meßkunst von den Römern geschätzt, so daß alles, was mit Messungen etwas zu tun hatte, mit dem Namen Herons in Verbindung gebracht wurde. So erklärt es sich, daß die ganz üblen Schriften aus der Zeit nach 600 n. Chr. unter dem Titel Herons Definitionen, Herons Geometrie und Stereometrie der Nachwelt überliefert sind.[2])

Der Bewunderung der Araber für Heron verdanken wir die Erhaltung der Mechanik, deren griechischer Text bisher verloren ist. Aber die Araber sind in der Mechanik nicht über Heron hinausgekommen, während sie im Gebiet der Astronomie und der Optik selbständige Leistungen aufweisen und in der Chemie ganz eigene Wege gehen. Im übrigen hat im Mittelalter die Aristotelische Philosophie die Alleinherrschaft so sehr, daß Roger Bacon (1214—1294) sein Wagnis, gegen Aristoteles aufzutreten, mit zehnjähriger Gefangenschaft in Paris büßte. Aus den vielen philosophischen Schriften des Mittelalters fallen für die Mechanik nur sehr vereinzelte Sätze heraus.

---

[1]) l. c. p. 292.

[2]) Hoppe, Ist Heron der Verfasser der unter seinem Namen herausgegebenen Definitionen und der Geometrie? in Philologus, N. F., Bd. 75, p. 202, 1918.

Mittelalter.

Es ist das Verdienst P. Duhems (1861—1918), durch Benutzung der vielen Manuskriptschätze der Pariser Bibliothek den Nachweis erbracht zu haben, daß das „dunkele“ Mittelalter doch in einzelnen Persönlichkeiten die Errungenschaften des klassischen Altertums nicht nur konserviert, sondern auch, freilich nur in bescheidenen Grenzen, gefördert hat. Leider sind die wertvollen Manuskripte noch immer nicht veröffentlicht, so daß eine allgemeine Nachprüfung ermöglicht wäre. Es ist das um so wünschenswerter, als Duhem bei dem Studium dieser Manuskripte dem Zwange aristotelischer Dialektik auch etwas erlegen ist und unter Vernachlässigung der oben mitgeteilten Grundanschauung des Aristoteles von der erzwungenen und natürlichen Bewegung eine aristotelische Physik konstruiert, die es unverständlich macht, daß gerade der Kampf gegen Aristoteles die Geburtsstunde der modernen Physik geworden ist. Der erste, welcher gegen Aristoteles Bewegungslehre energisch Front machte, war Johannes Philoponus 517 in seinem Kommentar zu Aristoteles' Physik[1]), wenn er sagt: Energien gehen von einem Körper auf einen anderen über, so daß dem geworfenen Körper eine vis impressa mitgegeben wird. Heytisbury hat 1330 schon den Satz, daß der Weg des fallenden Körpers in der zweiten Sekunde dreimal so groß ist als in der ersten, geschrieben.[2]) Oresme († 1382) zeigt, daß die Zeit, in welcher eine Strecke bei beschleunigter Bewegung durchlaufen wird, gleich der Zeit ist, in welcher dieselbe Strecke mit halber Endgeschwindigkeit gleichförmig durchlaufen würde.[3]) In gleichem Sinne schrieben Wilhelm von Occam († 1349) und Albert von Sachsen († 1390).

Im opus majus des Roger Bacon[4]) (1214—1294) finde ich als neu nur das eine, daß er von der Anziehungskraft zum Erdmittelpunkt spricht. Bei Albertus Magnus (1193—1280) findet sich der Satz: Experimentum solum certificat[5]), und als Aufgabe der Naturforschung: Wir haben zu untersuchen, was im Bereiche der Natur auf Grund der den Dingen eingepflanzten Ursachen geschehen kann.[6]) Aber er ist ein treuer Anhänger des Aristoteles. Ebenso stehen

---

[1]) Comm. in Aristot., Berlin 1888, p. 639. Erste Ausgabe 1542.
[2]) De sensu composito, 1494, fol. 40.
[3]) Duhem, Etudes s. L. de Vinci, III, p. 375 u. 457, 1913.
[4]) Bacon, Opera majus, p. 72.
[5]) Albertus magnus, De vegetabilibus, p. 339 (Jessen).
[6]) Id., De coelo et mundo, p. 75.

die Araber in bezug auf die Mechanik vollständig im Banne des Aristoteles und haben nichts geleistet.

Erst bei Nicolaus von Cusa (1401—1482) finden sich in der Übersetzung der Aristotelischen Schriften einige Versuche, über diesen Meister hinauszukommen. Die Erde ist ein Stern wie alle Sterne und hat mit ihnen die gleiche Substanz; sie hat eine dreifache Bewegung: 1. um ihre Achse, 2. um zwei Pole im Äquator (zur Erklärung der Präzession), 3. um die Weltpole.[1]) Er empfiehlt Fallversuche, um das Gewicht der Luft zu bestimmen, weist darauf hin, daß Wasser je nach der Reinheit verschiedenes spezifisches Gewicht hat, erfindet das Bathometer mit Ablösung eines Gewichtes vom Senkkörper, und will den hygroskopischen Charakter der Schafwolle benutzen, um ein Hygrometer durch Wägung herzustellen.

Auch die Lehre von der Statik ist im Sinne der Archimedesschen Statik gefördert durch Jordanus Nemorarius (1230) durch seine Gravitas secundum situs.[2])

Wie sehr in der Renaissance die Leistungen von Archimedes und besonders Herons den Antrieb gegeben haben, zeigt sich besonders an Leonardo da Vinci (1452—1519), dessen Werke erst lange nach seinem Tode herausgegeben sind, soweit sie sich auf Physik beziehen.[3]) In bezug auf die Mechanik ist Leonardo da Vinci nicht so selbständig, wie meist gesagt wird. Er zitiert mehrfach Archimedes, Euklid, Vitruv, aber Heron nur einmal, soviel ich sehe, und doch sind sehr viele seiner Konstruktionen mit Herons Apparaten identisch. Ich stelle einiges zusammen. Saugheber Cod. Atlant. 80_r = Pneumat. I_1, p. 28; Glockenheber (Stechheber) Cod. Atlant. 80_r = Pneumat. I_3, p. 40; Heber mit konstantem Ausfluß ib. = Pneumat. I, 4 u. 5, p. 44; der Vexierschoppen Cod. Par. G. 90 = Pneumat. I, 13, p. 84; die selbstregulierende Lampe Cod. Par. G. 41_r = Pneumat. I, 34 p. 162; die automatisch schließenden Türen Paris J. 30_r = Pneumat. I, 38, p. 174; die doppelt wirkende Druckpumpe Paris B 20_r = Pneumat. I, 28, p. 130; der Kran mit einem Mast Cod. Atlant. 49_v = Mech. III, 2, p. 202; die scharfen und flachen Schrauben Cod. Atlant. 14_v =

[1]) De docta ignorantia, II, p. 10, 1565.

[2]) Duhem, Les origines de la statique, I, p. 98—155.

[3]) Essai sur les ouvrages physico-mathematiques de L. de Vinci p. Venturi. Paris 1797. — Les manuscrits de L. de Vinci p. Ravaisson Mollien. Paris 1890. — Codex Atlanticus. Mailand 1896ff. — Sul moto e misura dell' aqua, 1828.

Mech. II , p. 104 u. p. 282; die Schraube ohne Ende Paris J. 26_r = Mech. II, 18, p. 140. Auch das Philosche Thermoskop ist bei Leonardo Paris A. 56_r vorhanden. Seine Behandlung des Hebels und der Satz von den virtuellen Momenten ist Heronsche Erfindung. Daß die Kraft proportional der durch sie verursachten Geschwindigkeit ist, haben wir bei Heron schon gefunden. Aber Leonardo geht doch nun über dies hinaus. Den Heronschen Satz von den virtuellen Geschwindigkeiten spricht Leonardo präziser aus: Wenn eine Maschine zum Bewegen schwerer Körper gebraucht wird, so haben alle Teile der Maschine, welche die gleiche Bewegung haben, gleiche Belastung; wenn der Bewegende in derselben Zeit mehr Bewegung hat als der Bewegte, so bedarf er einer kleineren Kraft und umgekehrt. Die von Heron wohl berücksichtigte Reibung (Mech. p. 170) wird von Leonardo präziser dahin gefaßt (der sogenannte Coulombsche Satz), daß die Reibung eines Körpers mit verschiedenen Seitenflächen gleichen Widerstand ausmacht, gleichviel auf welcher Seite er liegt, wenn er auf einer Ebene aufliegt. Neu ist bei Leonardo die richtige Erklärung der schiefen Ebene mit dem Verhältnis der Gewichte, die Leugnung eines perpetuum mobile, der Satz: Jeder Körper wuchtet in der Richtung seiner Bewegung. In bezug auf die Bewegungsgesetze stellt Leonardo fest, daß auf der schiefen Ebene die Geschwindigkeit in arithmetischer Proportion wachse, beim freien Fall erlangt der Körper in jeder Zeiteinheit gleiche Grade der Beschleunigung. Wir sehen, wollten wir diese Sätze in Formeln schreiben, so würden sie den Galileischen durchaus gleichen. Das Gesetz der kommunizierenden Röhren erweitert er auf verschiedene Flüssigkeiten, dann verhalten sich die Höhen umgekehrt wie die spezifischen Gewichte. Neu ist ferner die Behandlung der Wellen. Wasserwellen entstehen durch Windstoß; daß Wind bewegte Luft ist, die durch die Luftverdünnung bei Erwärmung entsteht, hatte schon Heron gelehrt, aber auf die mechanischen Wirkungen der Winde war er nicht eingegangen. Leonardo behandelt aber auch die Wellenfortpflanzung, die durch Einwurf eines Steines entsteht. Zwei Wellenzüge interferieren. Die Wellen werden reflektiert und aus der Interferenz der reflektierten Wellen mit den primären entsteht die Brandung.

Auf Grund seiner richtigen Ansichten über die Elastizität der Luft und das spezifische Gewicht erklärt er richtig die Wirkung des Schwimmgürtels, der Taucherglocke und des Fallschirms. Es darf aber nicht vergessen werden, daß diese Kenntnisse Leo-

nardos nur einem kleinen Kreise seiner Freunde und Schüler bekannt wurden. Unter den Bevorzugteren war, wie Duhem nachgewiesen hat, auch Cardanus (1501—1576), welcher in seinen Büchern De subtilitate und Opus novum weitestgehenden Gebrauch von Leonardos Kenntnissen machte, ohne ihn zu nennen. So ist doch eine Verbindung vorhanden zwischen Leonardo da Vinci und Stevin, Galilei und anderen. Ich verweise auf die umfangreichen Werke Duhems: Études sur Léonard de Vinci, 3 Bde., 1905—1913; Les Origines de la Statique, 2 Bde., 1905—1906; Le système du Monde, 5 Bde., 1912—1917.

Die Neuzeit.

1. Mechanik.

Mit dem Ende des 16. Jahrhundert beginnt die Neuzeit, die sich in bezug auf die Mechanik zunächst dadurch einführt, daß man sich von der Herrschaft des Aristoteles frei macht und nach allgemeinen Prinzipien auf Grund systematischer Experimente sucht. Aber die Anregungen und auch ein großer Teil der Resultate in den Arbeiten stammen noch aus dem Altertum, speziell von Archimedes und Heron, deren Werke besonders in Italien eine außerordentliche Verbreitung gefunden haben. Eine lateinische Ausgabe Herons erschien von Commandino 1575, die bereits 1580 eine zweite Auflage erlebte, italienische Übersetzungen erschienen von Aleotti 1589, Giorgi 1592 und Baldi 1601. Die Nichtbeachtung dieser Quellen führt leicht zu falschen Urteilen; z. B. schreibt Lagrange die Entdeckung des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten beim Hebel und Flaschenzug Guido Ubaldi Marchese del Monti in dessen Werk Mechanicorum liber 1577 zu, aber Ubaldi kommt in keiner Richtung über Heron hinaus. Auch Benedetti ist in seinem Diversarum speculationum math. et phys. liber 1585 noch wesentlich bei den Resultaten der Alten stehen geblieben, nur kann als neu die ausdrückliche Behauptung angegeben werden, daß bei der von Anaxagoras eingeführten Zentrifugallkraft erwähnt wird, daß sich der Körper in der Richtung der Tangente bewegt, wenn der zentripetale Zwang aufhört, und daß das Hebelgesetz auch für den Kniehebel gilt. Er spricht das Gesetz auch mit den statischen Momenten aus. Neu ist ferner der Satz, daß der schwere Körper nicht schneller fällt als der leichte, gegen Aristoteles.

Erheblich größere Selbständigkeit finden wir auch in der Mechanik bei Simon Stevin, 1548—1620, dessen Opera 1634 in Leiden erschienen. Das ihm meistens zugeschriebene Hebelgesetz brauchte er ja nicht mehr zu erfinden; er hat es aber mit statischen Momenten präzise ausgesprochen. Neu ist die Art seiner Erklärung der schiefen Ebene in Hypomnemata math. 1605. Er nimmt ein mit den Katheten 1′ und 2′ ausgesägtes Brett, hängt eine aus 12 Kugeln bestehende Kette über das auf der Hypotenuse liegende Brett, so daß 4 Kugeln auf der 2′ langen Kathete, 2 auf der 1′ langen ruhen, die anderen 6 hängen unter der Hypotenuse und es besteht Ruhe; sobald aber das Dreieck einseitig gehoben wird, fängt die Kette an, zu rotieren; würde sie es bei horizontaler Lage der Hypotenuse auch tun, „so wäre das ein perpetuum mobile und das ist absurd". Um die Sache auch mathematisch zu begründen, kommt er zum Kräfteparallelogramm in der Spartostatica. Dabei findet er das Prinzip der „geometrischen Addition" (Superposition). Drei auf einen Punkt wirkende Kräfte sind im Gleichgewicht, wenn ihre Größen nacheinander in paralleler Lage aufgetragen ein geschlossenes Dreieck bilden. Dann zerlegt er eine Kraft in Komponenten. Die Wahl dreier aufeinander senkrechter Komponenten ist aber erst von Mac Laurin in A complete system of fluxions, 1742, streng durchgeführt und von Euler in Theoria motus corp. solid., 1765. Euler hat nicht nur das Parallelogramm der Kräfte, der Geschwindigkeiten, der Beschleunigungen und die entsprechenden Zerlegungen angewandt, sondern er hat auch die Stevinsche geometrische Addition ausgebildet zur Vektorenrechnung. In der Mechanik (1736) hat er aus der Erkenntnis, daß es keinen absoluten Raum und keine absolute Zeit gibt, die richtige Konsequenz gezogen, daß es kein bevorzugtes Bezugssystem gibt, daß man also eine Bewegung nicht absolut darstellen kann durch Beziehung auf drei irgendwie gewählte Koordinatenachsen.

Man kann nun die Bewegung eines materiellen Punktes auch ohne ein solches Bezugssystem darstellen, wenn man für die Bewegung in einer Ebene, die Tangente an die Kurve und deren Normale als Koordinatenachsen wählt und dies System mit dem bewegten Punkte mitgehen läßt. Dann nimmt er den Geschwindigkeitsvektor in einem Punkte als Norm, in einem unendlich benachbarten Punkte hat sich dieser Vektor nach Richtung und Größe geändert. Um den zweiten aus dem ersten abzuleiten, bedarf es eines dritten Vektors, der nach der Stevinschen geometrischen Addition ge-

funden wird. Dieser ist ein Maß für die Bewegungsänderung. Das heißt, Euler hat hier mit Vektoraddition und Subtraktion, ohne den Namen Vektoren einzuführen, bereits gearbeitet.[1])

Das Pendel.

Das Pendel soll zur Zeitmessung schon von den Arabern, Ibn Yunis (1156—1242), benutzt sein nach einem Artikel von Edward Bernward, Phil. Trans. 14, p. 567, 1684. Bei den europäischen Völkern ist es zu diesem Zwecke zuerst von Jost Bürgi (1552 — 1632), dem Mechaniker und Astronomen des Landgrafen Wilhelm von Hessen und späteren Gehilfen Keplers gebraucht, der bereits um 1580 nach den Untersuchungen J. J. Bechers, De nova temporis dimetiendi ratione etc., 1680, cf. Physica subterranea, p. 489, 1730) für astronomische Beobachtungen die Schwingungsdauer eines Pendels benutzte. Er muß also bereits die Konstanz derselben gekannt haben. Unabhängig von ihm (die Bürgischen Entdeckungen sind zum Teil gar nicht, zum Teil viele Jahre nach der Erfindung erst veröffentlicht, so z. B. seine Logarithmen) hat nach dem Zeugnis Vivianis (Opera XV, p. 332) Galilei (1564—1642) im Jahre 1583 im Dom zu Pisa die Entdeckung der Konstanz der Schwingungsdauer und die Abhängigkeit von der Länge gemacht, aber erst sehr viel später hat Galilei die Ableitung des Pendelgesetzes gegeben, in: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige (1638) (Ostw. Klassiker 11, p. 74) und Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme (1632) (Ostw. Klassiker 24, p. 19), aber Galilei hat in diesen Arbeiten nicht das Pendel zur Zeitmessung benutzt, sondern die Zeit durch Wasserausfluß aus einer Schale gemessen. Er hat auch noch nicht die notwendige Bedingung kleiner Schwingungsbogen erkannt. Diese Beziehung ist zuerst von Pater Mersenne (Cogitata phys.-mathem., p. 42, 1644) so ausgesprochen: Zu einem größeren Bogen gebraucht das Pendel längere Zeit. Diese Notiz von Mersenne ist nach seinem Aufenthalt in Florenz geschrieben; es ist daher nicht festzustellen, ob er unabhängig zu dieser Erkenntnis gekommen ist, vor allem, da die gleiche Beobachtung sich auch unter den Resultaten der Accademia del Cimento findet (Musschenbroeks Übersetzung der Saggi, Tentamina exper., p. 20, 1731); sie fordern daher kleine

---

[1]) Eine ausführliche Darstellung dieser Eulerschen Entdeckung gab ich auf der Naturforscher-Versammlung in Leipzig 1922. Auszugsweise in Zeitschr. für Math. u. Naturw. Unterricht 1923, p. 181.

Schwingungsbögen. Diese Frage behandelt ausführlich Chr. Huygens (1629—1695) in seinem Horologium oscillatorium 1673 (Ostw. Klassiker 192, p. 12). Für Kreispendel berechnet er das Schwingungsdauerverhältnis bei einem Bogen von 90° zu dem bei einem Bogen kleiner als 1° wie 34 : 29. Er sucht dann nach einer Tautochrone und findet (ib. p. 70) die Zykloide; sie ist die Evolute einer Zykloide, daher wird ein Zykloidenpendel empfohlen. Für ein solches Pendel verhält sich die Schwingungsdauer des Pendels zur Zeit des freien Falles durch die halbe Pendellänge wie die Peripherie zum Durchmesser; also folgt für ein „einfaches" Pendel (was wir jetzt mathematisches Pendel nennen) die Relation $\tau = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$. In dieser Arbeit weist Huygens auch nach, daß die Zykloide nicht nur Tautochrone, sondern auch Brachystochrone ist.

Neuere elementare Ableitungen dieser Formel stammen von Kulik (nach Baumgarten und von Ettinghausen, Zeitschr. f. Phys. u. Math. 1, p. 337, 1826). Auch das zweite Glied der Reihenentwicklung leitet elementar ab Grunert (in seinem Lehrbuch der Physik I, p. 233, 1845), ferner J. Weingarten (Grunerts Arch. 25, p. 367, 1852). Die vollständige Reihe durch trigonometrische Formeln liefert A. Gernerth (Progr. d. k. k. academ. Staatsgymn. Wien 1853). Eine sehr übersichtliche Ableitung, bei welcher die Vernachlässigungen klar hervortreten, bietet J. J. Müller, Mathem. Supplem. zum Grundriß, 2. Aufl., p. 63, 1866 (vielleicht stammt diese Methode von v. Schmöger in Regensburg).

Analytische Ableitung der Schwingungsdauer als Funktion der Amplitude ist zuerst von Peter Fluius, der das Resultat gibt:

$$\tau = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \frac{h}{2l} + \left(\frac{1}{2}\cdot\frac{3}{4}\right)^2 \left(\frac{h}{2l}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\cdot\frac{3}{4}\cdot\frac{5}{6}\cdot\frac{h}{2l}\right)^3 + \ldots \right\},$$

wo $h = 2\,l \sin^2 \frac{\alpha}{2}$ und α = Amplitude ist, geliefert.

L. Euler (1707—1783) entwickelt die Reihe auch für Amplituden, die größer als $\frac{\pi}{2}$ sind (Acta ac. Petrop. 1777, II, p. 159) und Legendre (1752—1833) behandelt die Schwingungsaufgabe in voller Allgemeinheit (Mém. Paris 1786, p. 616). Damit kann das Problem des mathematischen Pendels als gelöst betrachtet werden.

Neben dem Kreispendel kommt schon bei Huygens in seinem 5. Teil des Horologium, das konische Pendel, vor (l. c., p. 190). Die Beweise zu den Sätzen sind aber erst aus dem Nachlaß 1703 herausgegeben und geben keine vollständige Lösung des Problems. Auch die Versuche De Mairans (Mém. Paris 1735, p. 153) führen

noch nicht zu einer befriedigenden Lösung, dagegen behandelt Clairaut (1713—1765) in demselben Bande, p. 281, die Pendelschwingungen auch des konischen Pendels unter der Einwirkung irgendeines Impulses; er setzt dabei wesentlich nur voraus, daß die Bewegung des Punktes dem Keplerschen Flächensatz (s. u.) genügt. Das Problem ist in seiner ganzen Allgemeinheit, d. h. in der Bedingung, daß der Punkt sich auf einer Kugeloberfläche bewegen soll, von L. Euler in der Mechanic 1736, II, § 161, behandelt. Euler hatte sich seit 1724 (Mém. Petersb. 9, p. 20) schon mit dem Problem des Synchronismus von Schwingungen beschäftigt und hat bis 1773 daran gearbeitet, zunächst um Kurven als Tautochronen zu bestimmen und dann speziell die Tautochronen in einer widerstehenden Flüssigkeit zu finden. Diese sind alle in den Kommentationen der Petersburger Akademie veröffentlicht, haben aber wesentlich mathematisches Interesse. Von einem anderen Gesichtspunkte aus behandelt Poisson (1781—1840) in Traité de méchanique 1811 das Problem, indem er von der Spannkraft des Fadens, allgemein von einer Zwangskraft, ausgeht. Doch ist die Untersuchung erst in der zweiten Auflage 1833 abgeschlossen. Nach dieser zweiten Auflage ist die deutsche Übersetzung von Stern 1835 bearbeitet. Darin findet sich das Problem p. 310. Inzwischen war aber schon von Pouillet (1790—1868) unter dem Titel Pendule à oscillations c niques in Hachettes Corresp. sur l'école polyt. III, p. 27, 1814/16, eine Lösung erschienen unter der Voraussetzung, daß die Anfangsgeschwindigkeit und die Anfangsamplitude α hinreichend klein sind, mit Polarkoordinaten. Die gleiche Methode benutzt Lagrange (1736—1815) in seiner zweiten Auflage von Méchanique analytique, Paris 1811—1815, um das Problem allgemein zu lösen. Allein in der Ableitung findet sich ein Fehler, der erst durch Bravais in der dritten Auflage 1853, p. 352, Note VII, richtig gestellt wird. Endlich findet Reuschle (Progr. zum Geburtstag d. Königs 1840) richtig das Maximum und Minimum. Das gleiche Resultat leitet Tissot wohl unabhängig 1852 in Liouv. Journ., p. 88, ab (s. auch Pogg. Ann. 86, p. 315, 1852). Das konische Pendel hat auch eine elementare Ableitung erfahren durch Rothe (Kastners Arch. IV, p. 385, 1825), welche in die Schullehrbücher Eingang gefunden hat, soweit darin überhaupt vom konischen Pendel die Rede ist.

Das physische Pendel oder, wie es ursprünglich von Huygens genannt wurde, das zusammengesetzte, hat schon Galilei, freilich vergeblich, versucht, auf das mathematische oder einfache zurück-

zuführen (Dialog über d. zwei Weltsyst. III, Anm. 1). Auch die Bemühungen Mersennes 1646 führten nicht zum Ziele (s. Descartes, Oeuvres IV, 1901, p. 362). Wenn auch die Idee Descartes' richtig ist, so hat er doch die Lösung nicht gefunden; das gelang erst Huygens (l. c., p. 111) durch Einführung des Schwingungsmittelpunktes, dessen Entfernung vom Aufhängepunkt $l = \frac{\Sigma m r^2}{\Sigma m r}$ bestimmt wird. Huygens spricht auch schon den Satz 20 so aus: Schwingungsmittelpunkt und Aufhängepunkt können miteinander vertauscht werden. Analytisch löst das Problem Euler in zwei Arbeiten De motu tautochrono pendulorum compositorum (Nov. Com. Petrop. 3, p. 286, 1753, und 18, p. 268, 1774).

Den Huygensschen Satz 20 grub v. Bohnenberger (1765 bis 1831) in seinem Lehrbuch der Astronomie 1811 wieder aus zur Konstruktion des Reversionspendels, welches seine Ausführung, seinen Namen und seine Anwendung (in Indien) durch Kapitän Kater (Phil. Trans. 1818) fand zur Feststellung der Länge des Sekundenpendels.

Die Benutzung des Pendels zur Zeitmessung wird oft Galilei als Erfindung zugeschrieben (s. o.). Bei seinen ersten Fallversuchen hat er die Zeit nach Pulsschlägen gemessen. Jedenfalls war das Pendel zu dauernder Zeitmessung so lange unbrauchbar, als es nicht mit einem Antrieb verbunden war. Die von Vincenzo Galilei ausgeführte (1649) Idee, das Pendel mit einem Zählerwerk zu verbinden, gestattete auch nur die Zeit zu messen, solange die lebendige Kraft des Pendelausschlags noch ausreichte, den Widerstand zu überwinden. Huygens hat das Pendel in die Uhr eingeführt, 1656, an Stelle der alten Balanzen zur Bewegung der Spindel (Horologium 1658).

Gerland hat in einer langen Arbeit den Nachweis erbringen wollen, daß weder Bürgi noch Huygens die Pendeluhr erfunden haben. In bezug auf Bürgi hat er aktenmäßig den Beweis erbracht, daß die „Planetenuhr" des Bürgi in Kassel zweimal umgebaut ist, 1676 und um 1756. Von dem zweiten Umbau wissen wir (Stegmann, Hist. Abhandl. usw., Kassel 1756, p. 11), daß damals ein neues Pendel, welches verkürzt oder verlängert werden konnte, eingesetzt wurde, worauf sich der Umbau 1676 bezog, ist aber nicht angegeben, jedenfalls hatte die Uhr nachher ein Pendel und die rückspringende Ankerhemmung; ob die Uhr vor diesem Umbau ein Pendel gehabt hat oder nicht, ist mit keiner Silbe angedeutet. Es ist also nichts gegen Bürgi bewiesen. Freilich müßte Bürgi

dann den Isochronismus der Pendelschwingungen erkannt haben, das aber behauptet ja auch die oben zitierte Notiz. Wenn Ibn Yunis sie erkannt hat und Galilei dieselbe 1583 erkannte, ohne in den nächsten 50 Jahren wieder darauf zurückzukommen, so kann Bürgi sehr wohl 1580 die gleiche Beobachtung gemacht haben.

Auch der Prager Professor Marcus Marci hat sie um 1638 erkannt, wo er also noch keine Kenntnis von Galileis Entdeckung haben konnte, denn die ist erst nach seinem Tode von Viviani bekannt gemacht. Marci schreibt (De proportione motus., Prag. 1639, Prop. 24): Perpendiculum ex quolibet puncto ejusdem circuli aequali tempore recurrit in suam stationem, und schlägt ein Horologium mit Hilfe eines Pendels vor. Aus den Verhandlungen Galileis mit den Generalstaaten (s. van Swinden, Verhandl. d. ersten Kl. van het kon. Nederl. Inst. v. wet. III, Amsterdam 1817) geht freilich hervor, daß Galilei sich 1636 mit der Idee getragen hat, ein Pendel zur Regulierung der Uhr zu benutzen; aber was davon berichtet wird, läßt erkennen, daß das Pendel nicht einen Trieb hatte und auch die Art, wie das Sperrad reguliert werden sollte, durchaus unpraktisch war. Erst Viviani erzählt 1659, also ein Jahr nach dem Erscheinen des Horologiums, daß Galilei 1641 die Idee, eine Pendeluhr zu bauen, gehabt und seinen Sohn damit beauftragt habe, der aber erst 1649 an die Ausführung ging, sie aber nicht vollendete, da er 1650 starb. Viviani hat dann auch einen Plan für die Konstruktion beigegeben, der immer als von Galilei herrührend bezeichnet wird. Es kann jedoch nicht zweifelhaft sein, daß die Zeichnung sicher nicht von dem völlig erblindeten Galilei gemacht sein kann, ob nach seinen mündlich gegebenen Anweisungen, oder ob erst später entworfen, ist nicht mehr festzustellen. Es ist jedenfalls sehr auffallend, daß die Ansprüche auf Galileis Erfindung erst ans Licht traten, nachdem das Horologium bereits ein Jahr lang erschienen und allgemein verbreitet war, man sollte meinen, wenn eine so wichtige und überall mit größtem Interesse begrüßte Erfindung wirklich vorhanden gewesen wäre, doch wenigstens in Briefen aus der Zeit vor 1658 einmal die Rede davon hätte sein müssen. Auch in den Saggi und in dem Bericht des Pater Mersenne (s. oben) findet sich keine Andeutung. Wir haben also ein Recht, zu behaupten, nicht nur, daß Huygens unabhängig von Galilei die Pendeluhr noch einmal erfunden habe, sondern, daß er sie wirklich erfunden und so eingerichtet hat, daß sie sofort brauchbar war und von Hunderten von Uhrmachern alsbald konstruiert wurde.

Der Brief Galileis vom 6. Juni 1637 an Realis (Saggi 1666, p. 16) beweist, daß damals Galilei wohl die Pendelschwingung zur Zeitmessung benutzen wollte, aber von einer Pendeluhr, d. h. von einem Antrieb, um die Pendelschwingungen konstant zu erhalten, ist auch nicht andeutungsweise die Rede. Die von der Accad. del Cimento verfaßte Beschreibung einer Uhr, bei welcher von der Kraft eines Hauptrades oder eines Gewichtes ohne Angabe des Mechanismus die Rede ist, stammt aus dem Jahre 1666, kann also Huygens Priorität durchaus nicht in Frage stellen. Dagegen hat Wolf (Vierteljahrsschrift d. Züricher naturf. Gesellsch. 1873, p. 99) durch die Auffindung des Manuskripts von Rathmann, der mit Bürgi gleichzeitig in Kassel arbeitete, sehr wahrscheinlich gemacht, daß Bürgi tatsächlich eine Pendeluhr angefertigt hat, wenn auch die in der Wiener Schatzkammer aufbewahrten Uhren nicht von Bürgi herrühren.

Nun trat die Frage nach dem Widerstand in den Vordergrund, da es ein praktisches Interesse war, sie zu lösen. Schon Galilei stellt fest, daß der Widerstand (Luftwiderstand) mit der Geschwindigkeit wächst (Ostw. Klassiker 11, p. 17). Ausführlich geht Newton (1642—1727) auf das Problem ein und behandelt in seinen Philosophiae naturalis principia mathematica 1687, II, c. 6, p. 305, speziell den Widerstand für Zykloidenpendel; das Resultat heißt: w ist proportional c^2. Die Abnahme des Schwingungsbogens gibt ein Maß für den Widerstand, indem die Differenz des Bogens beim Fallen minus dem Bogen bei dem darauffolgenden Steigen dem Widerstand proportional ist. Im Newtonschen Sinne beschäftigt sich dann J. Hermann (1678—1733) mit dem Widerstande auf der Brachystochrone (Com. Acad. sc. Petrop. II, 1727, p. 139). Die Behandlung dieser Aufgabe setzte sein Nachfolger im Petersburger Amte, Daniel Bernoulli (1700—1782), fort, indem er zunächst den Widerstand bei beliebiger Bewegungskurve untersuchte (ib. IV, p. 136, 1729), dann das Hermannsche Problem und das Kreispendel (ib. V, p. 106, 1730). Auch dessen Nachfolger, Euler, widmet der Reibung des Pendels zwei Untersuchungen (N. Com. Petrop. 6, p. 233, 1761, und Abhandl. Petersburg 1780, II, p. 164, erschienen 1784).

Die Ausdehnung der Versuche auf das Horizontalpendel ist von Coulomb (1736—1806) in der Arbeit über die „balance de torsion“ (Mém. de l'acad. Paris 1784, p. 229) in bezug auf den Widerstand der Luft ausgeführt (Mém. de l'Inst. an. 9, p. 246, 1800). Er findet da die Abhängigkeit von der ersten und zweiten Potenz

der Geschwindigkeit.[1]) Sehr eingehende theoretische Behandlung l'es Problems bietet Poisson in den beiden Arbeiten Journal de dÉcole Polyt. VII, p. 143, 1808, und ib. VIII, p. 345, 1809, für den Fall kleiner Schwingungen und der Proportionalität mit der ersten oder zweiten Potenz der Geschwindigkeit. Er berücksichtigt nicht nur den Widerstand der Luft, sondern auch den des Fadens, und stellt die ganze Sache noch einmal zusammenfassend dar in Connaissance des tems pour 1834, p. 18. Vom Zykloidenpendel geht Airy (1801—1892) aus in Trans. of the phil. soc. of Cambridge III, p. 105, 1830, behandelt aber den Widerstand dann ganz allgemein für alle Schwingungen. Diesen Gedanken führt unter Ausdehnung auf die innere Reibung des Gases weiter G. Stokes (1819—1903) (ib. Bd. 9 II, p. 8, 1851), jedoch ist eine einwandfreie und alle Verhältnisse beachtende Lösung des Problems erst von O. E. Meyer (1834—1909) in Crelles Journal 73, p. 31, 1871, und 75, p. 336, 1873, gegeben. Die experimentelle Begründung seiner Resultate gibt Meyer in Pogg. Ann. 142, p. 481, 1871. Weitere Untersuchungen der Pendelschwingungen finden sich in den Arbeiten von Giulio in Mem. d. R. ac. di Torino, 2. Ser. XIII, p. 299, 1853; unter Berücksichtigung von zwei Gliedern der Reihe bei Stamkart, Verh. van het K. Nederl. Inst. Amsterdam, 3. R. I, p. 218, 1849; ferner bei Gronau, Progr. der Johannisschule z. Danzig 1850; R. Hoppe, Pogg. Ann. 93, p. 321, 1854, und abschließend bei Oppolzer, Sitzungsber. der k. k. Acad. zu Wien 82 II, p. 713, 1882.

Außer dem Luftwiderstand sind aber noch andere Störungsfaktoren zu berücksichtigen, zunächst der Einfluß des Mediums durch den Auftrieb. Diese Frage behandelt Newton (Princip., 2. Aufl., 2. Bd. VI, § 34). Nicht g ist die Beschleunigung, sondern $\frac{M-m}{M} \cdot g$, wo M die Masse des Pendels, m die der verdrängten Flüssigkeit ist. Aber die Luft wird auch mitbewegt und darum ist der Widerstand beim Fallen größer, beim Steigen kleiner als bei konstanter Bewegung. Die Versuche, welche Newton in dieser Richtung anstellt, ergeben, daß der Widerstand proportional dem Quadrat des Durchmessers der Kugel und der Dichtigkeit des Mediums ist. Den Einfluß der mitschwingenden Luft untersucht experimentell und theoretisch L. G. du Buat (1732—1787) in Principes d'Hydrau-

[1]) Nach einer Bemerkung von Cavendish (Phil. Trans. 1798, Abr. XVIII) soll die Drehwage von John Michel schon vor Coulomb erfunden und eine Methode angegeben sein, um mit ihrer Hilfe die Dichte der Erde zu bestimmen. In den von J. Michel veröffentlichten Arbeiten findet sich keine Theorie.

lique, Paris 1786. Eine vollständige Theorie geben für die mitbewegte Luft Poisson in Mém. de l'ac. Paris 11, p. 521, 1832, desgleichen Plana (Mém. de l'ac. de Torino 38, p. 209, 1835) und Green (Trans. of the R. Soc. of Edinburgh 13, p. 54, 1836).

Den Einfluß der Aufhängung behandelt, wenn das Pendel auf Schneiden ruht, zuerst Euler (Act. Acad. Petrop. 4, II, 1780, p. 133 u. 165) und in einer posthumen Veröffentlichung (Nov. acta Petrop. 6, p. 145, 1788). Wenn das Pendel an einem Faden aufgehängt ist, spielt natürlich die Torsion und Elastizität desselben eine wichtige Rolle; dieselbe findet eingehende Bearbeitung durch Jac. Bernoulli (Nov. acta Petrop. I, 1783, p. 213; II, p. 131; III, p. 149 u. IV, 1786, p. 102). Die Drehung der Schwingungsebene bei solcher Aufhängung ist eingehend untersucht von Lampe (Progr. d. städt. Gymn. Danzig 1866) und erschöpfend von O. E. Meyer (Pogg. Ann. 142, p. 508, 1871).

Eine alle Störungen beachtende Behandlung des Sekundenpendels liefert Bessel (1784—1846) in Abh. der Acad. zu Berlin 1829, p. 1 (für 1826). Er zeigt, daß die verschiedenen Ursachen des Widerstandes nicht durch eine allgemeine Formel erledigt werden können; in welchem Maße die einzelnen Faktoren wirksam sind, hängt ganz von der Konstruktion des Apparates ab. Den Einfluß des Mediums behandelt er in Art. 13 ausführlich und bestimmt die Konstante für Luft experimentell durch Untersuchungen im Jahre 1828, ebenfalls findet der Einfluß der Aufhängung an einem über einen Zylinder hängenden Bande seine Erledigung. Bessel macht auch auf die Fehlerquellen beim Reversionspendel aufmerksam und kritisiert die Katerschen Messungen. Diese Frage nach der Leistungsfähigkeit eines solchen Reversionspendels zur Bestimmung des Sekundenpendels ist noch einmal in ausführlicher Weise bearbeitet in der letzten Arbeit, die W. Weber geschrieben hat (Wied. Ann. 22, p. 439, 1884). Darin gibt er auch Vorschriften für die beste Konstruktion.

Die Besselschen Vorschriften für ein Reversionspendel sind dann von Repsold wirklich ausgeführt in dem Bessel-Repsoldschen Reversionspendel 1830.

Die Zurückführung des physischen Pendels auf das mathematische durch Bestimmung des Schwingungsmittelpunktes wurde von Zwerger in einer Monographie: Der Schwingungsmittelpunkt zusammengesetzter Pendel, München 1889, zusammenfassend durchgeführt. (Anwendungen des Pendels, besonders in der Geophysik, werden weiter unten besprochen.)

Daß die Temperatur für die Schwingungsdauer des Pendels zu beachten ist, hat zuerst Picard (1620—1682) in Mém. de l'ac. de Paris 1670 in dem Artikel: Sur l'avance des pendules en été et sur leur retard en hiver, ausgesprochen. Die Beseitigung des Temperaturfehlers unternahm der Londoner Chronometermacher G. Graham (1675—1751). Zunächst versuchte er, durch Anwendung verschiedener Metalle in Form eines Rostes (1715) die Ausgleichung zu erhalten; da ihm das nicht hinreichend gelang, konstruierte er (Phil. Trans. 1726) die Quecksilberkompensation. Unabhängig von Graham fand John Harrison (1693—1776) im Jahre 1725 das aus neun abwechselnd aus Messing und Eisen bestehenden Stangen hergestellte Rostpendel. Er brachte auch zuerst die Temperaturkorrektion bei tragbaren Uhren an und erhielt für eine solche Uhr, die auf einer Reise von London nach Jamaika und zurück beobachtet war, den von der Roy. Soc. ausgesetzten Preis 1765. Die von ihm angewandten Methoden sind in Principles of time-keeper, London 1767, und Description, cons. such mech. as will afford a nice or true mensuration of time, 1775 beschrieben.

Von besonderer Bedeutung für die moderne Erdforschung ist das Horizontalpendel geworden. Wenn ein Pendel nicht um eine horizontale Achse schwingt, sondern diese gegen den Horizont geneigt ist, so wird die Schwingungsdauer größer, und wenn die Achse vertikal steht, ist sie unendlich, d. h. das Horizontalpendel ist in jeder Lage in Ruhe. Man kann also durch beliebige Annäherung an diesen Grenzfall das Direktionsmoment des Pendels so klein machen, wie man will, und dadurch eine Empfindlichkeit erzielen, die auf die geringste äußere Kraft (Erdstoß) reagiert. Der erste, welcher diese Eigenschaft erkannte und daraufhin eine „Pendelwage“ konstruierte und deren Mechanismus vollständig entwickelte, war Lorenz Hengler (1806—1858), damals noch Student in München (Dinglers polytechnisches Journal 43, p. 81, 1832). Aber diese wichtige Erfindung blieb völlig unbeachtet. Das gleiche Schicksal hatte eine Notiz, welche Perrot am 31. März 1862 der Pariser Akademie unterbreitete (Compt. rend. 54, p. 718, 1862), worin er ein nach den gleichen Prinzipien erbautes Instrument beschreibt. Erst als Fr. Zöllner (1834 bis 1882), ohne von beiden Vorgängern etwas zu wissen, das Prinzip neu fand und in einem sorgfältig konstruierten Apparat verwendete, wurde das Seismometer in die Wissenschaft eingeführt (Pogg. Ann. 150, p. 131 u. 134, 1873; Berichte Leipzig 1869, p. 281; 1871, p. 479).

Bewegungslehre, Phoronomie.

Der erste, der sich völlig von Aristoteles emanzipiert, ist Kepler (1571—1630). Schon in seiner ersten Schrift, dem Prodromus continens Mysterium cosmographicum, 1596 (2. Aufl. 1621), führt er p. 58 die Bewegung des Mondes auf eine Anziehung desselben durch die Erde zurück (luna potius trahitur). Um die Bewegung zu verstehen, muß man bedenken, daß alle Materie eine Neigung hat zur Ruhe (ad quietem inclinat), sie bleibt an dem Orte, wo sie ist. Die bewegende Kraft muß also mit der inertia der Materie kämpfen. Die Ursache der Bewegung ist eine vis immateriata (p. 77), und die Ursache, daß sich die Planeten in größerer Entfernung langsamer bewegen, ist die, daß diese virtus der Sonne mit größerer Entfernung abnimmt. In der Astronomia nova 1609 ist Kepler schon zu größerer Klarheit über diese Verhältnisse durchgedrungen. Die Schwere ist eine allgemeine Eigenschaft aller Materie und die Anziehung derselben ist proportional den Massen, so daß die Erde den Stein mehr anzieht als der Stein die Erde. Wenn zwei Steine allein im Weltenraum wären, frei von der Wirkungssphäre eines dritten Körpers und ohne eine Eigenbewegung, so würden sie sich an einer Stelle in der Verbindungslinie treffen, so daß die zurückgelegten Wege sich umgekehrt wie ihre Massen verhielten. Es gibt keine absolut leichten und absolut schweren Körper, sondern leichter und schwerer ist relativ zu verstehen (gegen Aristoteles). Die Anziehung wirkt nach allen Seiten gleichmäßig, nicht wie der Magnetismus nur in Richtung auf die Pole (gegen Gilbert). Die inertia der Materie ist der Widerstand gegen jede Bewegungsänderung. Wenn der Mond nicht durch die Zentrifugalkraft gehalten würde, würde er auf die Erde fallen wie jeder Stein; aber die vis insita treibt ihn in der Richtung der Tangente. Derselbe Gedanke mit Anwendung auf die Jupitertrabanten (die mediceischen Sterne) ist dann von Borelli (1608—1679) ausgesprochen, in demselben Jahre, in welchem Newton nach Aussage Brewsters auf den Gedanken der Gravitation gekommen sein soll. Borelli erweitert die Gravitation auch auf die Planeten! (Theoricae Mediceorum planetarum ex causis physic. deductae, Florenz 1666). Noch erheblich weiter kommt Kepler in den Epitomes Astronomiae, deren erste drei Bücher 1618, deren viertes 1622, und deren letztes 1621 erschienen. Im vierten Buche beschäftigt sich Kepler mit den kosmischen physikalischen Fragen. Die Himmelskörper haben ebenso wie die irdischen

die inertia (Trägheit), sollen sie also bewegt werden oder ihre Bewegung ändern, so muß eine Kraft auf sie wirken, die diese Trägheit überwindet. Hätten sie keine Trägheit, so würde eine unendlich kleine Kraft ausreichen, ihnen in einem Moment unendliche Geschwindigkeit zu verleihen; daß alle Planeten bestimmte Umlaufszeit haben, beweist, daß sie Trägheit besitzen. Diese vis prensandi (prenso = ergreifen, anziehen) ist eine körperliche, die sich geradlinig im Raume ausbreitet, durch alle Körper hindurch wirksam ist, zum Unterschied von Licht- und Wärmestrahlung. Dieselbe Kraft, welche zwischen Sonne und Planeten wirkt, ist auch für Erde und Mond maßgebend und erklärt auch die Ebbe und Flut, geht also auch vom Monde aus. Nun untersucht er die Abhängigkeit von der Entfernung, nachdem er die Proportionalität aus dem Produkt der Massen abgeleitet hat. Da zeigt er zunächst, daß die Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, ebenso die Wärmewirkung; er sagt auch (p. 534), daß, wenn die Erde in die Bahn des Saturn gesetzt würde, die Kraft dem Quadrat der Entfernung entsprechend abnehmen würde. Trotzdem gibt er diesen richtigen Gedanken wieder auf, weil die Anziehung durch die Sonne nur in Richtung der Bahn der Planeten wirksam ist, während senkrecht dazu keine Komponente wirksam sei; darum müßte man doch annehmen, daß sie linear von der Entfernung abhänge, nicht flächenhaft (p. 528). Es handelte sich für Newton also nur um die Beseitigung dieses Fehlers, statt $\frac{m \cdot m'}{r}$ (p. 528) zu setzen den p. 534 gegebenen Ausdruck $\frac{m \cdot m'}{r^2}$. Diese Vorgeschichte des Attraktionsgesetzes zeigt ferner, daß alle die wunderbaren Anekdoten, welche über den Weg, auf welchen Newton zum Attraktionsproblem gekommen sein sollte, erzählt werden, schön erfunden sind. Auch der fallende Apfel findet sich bei Kepler als Beispiel. Und es ist von Newton selbst bezeugt, daß er Keplers Werke studiert habe, ehe er an die Mechanik ging. Ich bemerke ferner, daß Kepler auch das Wort Energie zuerst gebraucht (Harmonices mundi, p. 163), allerdings nicht für den präzisen Arbeitsbegriff, aber doch für die Leistung der von den Körpern (Erde) ausgehenden Kräfte. Ehe ich die Gravitation weiter verfolge, ist noch einiges von Kepler nachzutragen, was indirekt mit der Gravitationsfrage zusammenhängt.

Zunächst seine drei bekannten Gesetze. Das erste wird sehr sorgfältig in Astron. nova IV, p. 59, abgeleitet (Opera, Frisch. III, p. 337—401), indem er zeigt, daß alle anderen Versuche, die

Bahn des Sternes darzustellen, scheitern und nur die Ellipse mit der Sonne im Brennpunkt die Beobachtungen befriedigend deckt. Das zweite Gesetz (ib. p. 401—408), ebenfalls aus den Beobachtungen am Mars abgeleitet, ist Kepler auch schon seit 1600 bekannt gewesen und wird so von ihm ausgesprochen: Die Zeiten, in welchen zwei Bogenstücke durchlaufen werden, verhalten sich wie die zugehörigen Sektoren. Das dritte Gesetz hat er am 15. Mai 1618 nach 17jähriger Arbeit gefunden: Sed res est certissima exactissimaque, quod proportio, quae est inter binorum quorumcumque Planetarum tempore periodica, sit praecise sesquialtera proportionis mediarum distanciarum (Harm. mundi V 3, p. 189, 1619). Naturgemäß kommt bei ihm auch zuerst das Dreikörperproblem vor (De lunae hypothesi 1602, Opera 3, p. 650), aber er weiß keinen Weg zur Behandlung. Aber die Flut und Ebbe auch für die abgewandte Seite der Erde erklärt er richtig aus der Anziehung des Mondes, ebenso erwähnt er das Entstehen besonders hoher Fluten (Springflut) durch die Konjunktion von Sonne und Mond. In den Geschichtswerken wird ferner berichtet, daß Galilei etwa 1638 die Libration entdeckt habe; das ist irreführend. In den Epitomes V, p. 647, also 1621, gibt Kepler eine eingehende theoretische Ableitung der Libration, die auch den Namen erklärt; zunächst allgemein für die Planeten und im sechsten Buche die Berechnung für den Mond (p. 819). Galilei kann also nur die Keplersche Rechnung durch Beobachtung 17 Jahre nach Kepler bestätigt haben.

Galilei (1564—1642) hat mit Kepler gewetteifert, die Aristotelische Physik zu beseitigen. Schon Benedetti (1530—1590) hatte im Diversarum speculationum liber 1585 den aristotelischen Satz, daß schwere Körper schneller fallen als leichte, bestritten, auch in bezug auf die Zentrifugalkraft sich an Anaxagoras gegen Aristoteles angeschlossen und die Tangente als die jeweilige Richtung des rotierenden Körpers bezeichnet. Bald nachher muß Galileis erstes größeres Werk, de motu gravium, geschrieben sein, jedenfalls während seiner ersten Professur in Pisa (1589—1592). Erschienen ist diese Arbeit erst in den gesammelten Werken (1842 bis 1856). Er zeigt darin, daß die schweren und leichten Substanzen gleicher Form in gleicher Zeit von der Höhe des schiefen Turmes zur Erde fallen, und fügt folgende logische Begründung hinzu: Wird ein schweres mit einem leichten Gewicht verbunden, so müßte das schwere dem leichten Beschleunigung, das leichte dem schweren Verzögerung verursachen, es müßte also eine mittlere Geschwindig-

keit dabei herauskommen, andererseits aber müßte die verbundene Masse, weil schwerer, schneller fallen. Nahezu gleichzeitig hat Thomas Campanella (1568—1639) in seiner Philos. sensibus demonstrata (1591, Neapel) den Satz ausgesprochen: Von zwei gleich schweren Körpern fällt der kleinere schneller als der größere, weil er den Widerstand der Luft leichter überwindet. Im leeren Raume aber fallen alle Körper gleich schnell!

Erst am Abend seines Lebens kommt Galilei auf diese mechanischen Probleme zurück in seiner mechanischen Hauptschrift: Discorsi e dimostraz. math. int. a due nuove scienza etc., 1638 (Leyden) (Ostw. Klassiker 11, 24 u. 25). Da gibt er in den sechs Tagewerken, man würde das heute eine Hochschulwoche nennen, eine Übersicht über die Phoronomie. Nachdem G. schon im 1. Tage die Fallgesetze und Pendelschwingung berührt hatte, geht er im 3. Tage auf das gesamte Problem näher ein, behandelt die gleichförmige Bewegung, dann die gleichförmig beschleunigte ganz allgemein, definiert richtig die Beschleunigung, zeigt daß die Geschwindigkeit dann nicht proportional der durchlaufenen Wegstrecke ist, sondern der Zeit. Darin (p. 19) sind die beiden Theoreme enthalten: 1. Bei gleichförmig beschleunigter Bewegung ist der zurückgelegte Weg gleich dem bei konstanter halber Endgeschwindigkeit; 2. Die Strecken verhalten sich wie die Quadrate der Zeiten! Unter Anknüpfung an die schon 1602 angestellten Beobachtungen über das Hinabgleiten von polierten Messingkugeln in schräg aufgestellten, 12 Ellen langen Rillen leitet er das Gesetz ab: In den einzelnen Zeitteilen verhalten sich die Wege wie die ungeraden Zahlen. Mit Hilfe der bekannten Dreieckdarstellung gewinnt er die Weglänge $s = \frac{a}{2} t^2$. Intensiv untersucht er die schiefe Ebene, findet, daß die Fallzeit auf der schiefen Ebene sich zu der beim freien Falle wie l zu h verhält. Setzt man den idealen Fall reibungsloser Bewegung voraus, so wird (Theorem III), wenn ds ein Wegelement auf der schiefen Ebene ist, ds' ein für den gleichen Zeitpunkt gewähltes Wegelement für einen freien Fall, stets die Beziehung $ds : ds' = l : h$ bestehen. Auch das Beharrungsgesetz drückt er mit folgenden Worten aus (p. 57): Der Geschwindigkeitswert, den der Körper aufweist, ist in ihm selbst unzerstörbar erhalten. Beschleunigung und Verzögerung kommen durch äußere Kräfte zustande. Ist die Bewegung horizontal reibungslos, so ist sie unaufhörlich. Noch mehrfach kommt er auf dies Gesetz zurück und gibt ihm verschiedene Fassungen, so auch im 4. Buche. Diese Überlegung führt ihn zum horizontalen

Wurf (4. Tag). Die Lösung ist ganz geometrisch in Archimedesscher Art. Dann folgt der schiefe, reibungslose Wurf, indem er die Geschwindigkeit in Richtung der Tangente über die Bahn verfolgt und beweist, daß die Bahn eine Parabel ist. Er berechnet die Wurfweite, deren Maximum bei 45^0 eintritt, gibt für beliebige Zeiten die Wegkomponenten richtig an. Damit sind die Fall- und Wurfgesetze festgestellt. Obwohl Galilei mehrfach betont, daß alle Körper schwer sind, ist er doch in bezug auf die Gravitation nicht zu der Klarheit Keplers durchgedrungen. Das zeigt sich auffallend im 4. Tage des Dialogs über die zwei Weltsysteme, wo er die Ebbe und Flut nicht aus der Anziehung des Mondes erklärt, sondern durch die Rotation der Erde um ihre Achse, nach Anleitung eines Experiments, daß nämlich das Wasser eines nach einer Richtung bewegten Wasserbeckens einen rückwärts gerichteten Druck erfahre. So soll die Flutwelle abhängig sein von der Geschwindigkeit, und da auf der der Sonne zugewendeten Seite die relative Geschwindigkeit kleiner ist als auf der abgewandten, so muß auf der letzteren eine um so höhere Flut erscheinen.

Die Fallversuche hatten nicht nur das Interesse, die Fallgesetze dadurch abzuleiten; eine zweite Aufgabe war die, durch Fallversuche den Beweis zu erbringen für die Rotation der Erde. Schon Tycho (1546—1601) hatte in De mundi aetherei recentioribus phaenomenis (1588—1610) als Hauptgrund gegen die Erddrehung angegeben, daß ein Stein, an der Westseite eines Turmes abfallend, nach Westen von der Lotlinie abweichen müsse, „da die Erde während seines Falles ja unter ihm fortlaufe nach Osten"! Zunächst war allerdings notwendig, gegenüber den vielen Feinden der Galileischen Darstellung die Fallversuche durchaus sicher zu stellen. Torricelli hat gewissermaßen dazu das Programm geschrieben: De motu gravium naturaliter descendentium, 1641. Noch zu Lebzeiten Galileis hatte Pater Ariaga den Luftwiderstand für die Verschiedenheit der Fallzeiten bei schweren und leichten Körpern verantwortlich gemacht (s. oben Campanella). Die Proportionalität der Fallräume mit den Quadraten der Zeiten bei den Versuchen von Riccioli und Grimaldi (Almagest. novum 1651, I, p. 90; II, p. 387, Bonn) ist so groß, daß man Frisur vermuten muß. Immerhin ist darunter die interessante Methode zum ersten Male gebraucht, die Geschwindigkeit, mit welcher eine fallende Kugel in eine Wagschale fällt, durch die Größe des Gewichtes zu bestimmen, welches dadurch gehoben wird, also eine energetische Meßmethode vor dem Gesetz der Erhaltung der Kraft!

Zuverlässiger sind die Resultate aus den vielen Versuchen Deschales in Cursus seu mundus mathem., 1674, Lugd. Dieser findet mit wachsender Zeit steigende Abweichung vom Gesetz und erklärt dies richtig durch den Luftwiderstand. Am 28. November 1679 schrieb nun Newton an Hooke, man solle durch Beobachtung der Abweichung des fallenden Körpers von der Lotlinie den Beweis für die Erddrehung liefern, aber diese Abweichung sei nicht, wie Tycho gemeint, eine westliche, sondern eine östliche, indem der Stein in der Höhe eine größere Geschwindigkeit habe als am Fuße des Turmes. Die Roy. Soc. beschloß auch die Ausführung des Versuches, allein Hooke wählte eine Fallhöhe von 27′ und konnte daher keine Abweichung finden. Erst Guglielmini 1791 und dann J. F. Benzenberg 1802 im Michaelisturm in Hamburg mit 235′ Höhe und 1804 im Steinkohlenschacht zu Schleebusch mit 262′ Fallhöhe fanden wirklich die östliche Ablenkung (Benzenberg, Versuche über das Gesetz des Falles usw., Dortmund 1804). Die ausführlichsten Versuche, deren Resultate mit der Theorie sehr genau übereinstimmen, sind von Reich 1832 im Dreibrüderschacht bei Freiberg mit 488′ Fallhöhe ausgeführt (Pogg. Ann. 29, p. 494, 1833).

Guglielmini hat seine Versuche in De diurno terrae motu, Bononiae 1791, beschrieben. Benzenberg hat in seinem Buche: Versuche über die Gesetze des Falles, den Widerstand der Luft und die Umdrehung der Erde, Hamburg 1791, auch die von Olbers (1758—1840) gegebenen Formeln für die östliche und südliche Ablenkung mit Ableitung angeführt, und zwar die östliche $\frac{4\pi \cos\varphi \cdot h}{3T}\sqrt{\frac{2h}{G\varphi}}$, für die südliche $h \cdot \operatorname{tang}\varphi \cdot \frac{0{,}03391 \cdot \cos^2\varphi}{G\varphi}$; wo h die Höhe der Fallstrecke, T die Umdrehungszeit der Erde, φ die Breite und G_φ die Fallbeschleunigung für einen Radius $R+h$, wo R der Erdradius ist, bedeuten. Diesen Fallversuchen entsprechen auch die Versuche mit einer vertikal abgeschossenen Kugel, zuerst ausgeführt von Furtenbach (Halinitropyrobolia, Ulm 1627). Die durch die Erdrotation bedingte Abweichung ist von d'Alembert (Hist. de l'ac. Paris 1771, p. 10) und Poisson (C. R. 5, p. 660) analytisch behandelt. Die von Zöppritz für die Rechts- (bzw. Links-) Abweichung gegebene Formel $\sigma = w.v.\sin\beta.t^2$, wo w die Winkelgeschwindigkeit der Erde, v die Geschwindigkeit des Geschosses, β die Breite, t die Zeit ist (Verh. d. 2. Geographentages Berlin 1882, p. 47) ist nur eine Annäherung, wie Finger gezeigt hat (Berichte der Acad. Wien 76, p. 67).

Das didaktische Interesse an den Fallversuchen führte zur Konstruktion von Fallmaschinen. Neben Galileis „Fallrinne" (s. oben) hat sich bis in die neueste Zeit die G. Atwoodsche Fallmaschine in den Lehrmittelsammlungen erhalten (G. Atwood: A treatise on the Rectilinear Motion and Rotation of Bodies, Camb. 1784). Wesentliche Änderungen an der Maschine durch Poggendorff, indem die Beschleunigung durch Gewicht gemessen wird (Pogg. Ann. 58, p. 466, 1843, und 92, p. 179, 1854), mit elektrischer Auslösung und Zeitbestimmung durch Waldner (Pogg. Ann. 154, p. 597, 1875). Praktische Abänderung am Poggendorffschen Apparat gab K. L. Bauer (Wied. Ann. 17, p. 1037, 1882). Apparat für den Fall im luftleeren Raume konstruierte Puluj (Wied. Ann. 33, p. 375, 1888).

Kehren wir zu Galilei zurück. In seinem Dialog über die zwei Weltsysteme 1632 hatte Galilei bereits von der Schwungkraft am 2. Tage gehandelt und gezeigt, daß bei den Größenverhältnissen der Erde die Schwungkraft sehr viel geringer ist als die Schwere. Auf diese Schwungkraft, vis centrifuga, geht näher ein Huygens (1629—1695) schon in dem Horologium oscillatorium, 1673. Doch gibt er hier nur die Resultate seiner Untersuchung, während die Ableitung erst in dem nach seinem Tode 1703 veröffentlichten Aufsatz De motu et vi centrifuga unter den Opera veröffentlicht wurde. Damit ein Körper im Kreise um einen Punkt herumgeführt werde, muß in Richtung des radius vector eine Kraft wirken, die proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit und umgekehrt der Entfernung ist, oder, wenn die Umlaufszeit t genannt wird, eine Kraft, die proportional $4r\pi^2/t^2$.

Schon ehe Newtons Mechanic erschienen war, beschäftigt Huygens sich mit dem Einfluß der Zentrifugalbeschleunigung auf die Gravitationsbeschleunigung in der Arbeit Discours de la cause de la pesanteur, 1681, die aber erst als erster Teil der Dissertatio de causa gravitatis, 1690, gedruckt wurde und durch das Additamentum ergänzt war. Am Äquator ist die Zentrifugalbeschleunigung $= G/289$, wenn G die Beschleunigung durch die Schwere ist; daraus folgt das Verhältnis der Achse zum Äquatordurchmesser wie 577 : 578. Dann leitet er G_φ für die Breite φ ab, und erklärt damit die Beobachtung Richers 1671, daß das Sekundenpendel in Cayenne $^5/_4$ Linien kürzer ist als in Paris. Eine vollständige Ableitung der Zentrifugalkraft mit Beweisen ist von Huygens erst in den Opuscul. posth. Lugd. Batav. 1703, 4, p. 401, erschienen. Darin auch die Theorie des konischen Pendels.

Sehr ausführlich handelt I. Newton (1642—1727) im 1. Buch seiner Philos. naturalis principia math. 1687, in Abschnitt 2—8 von den Zentripetalkräften. Als Grundlage für diese Bewegung beweist er den Satz: Bei nicht Widerstand leistenden Medien sind die Kräfte zum Zentrum gerichtet, wenn bei der Rotation in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume durchlaufen werden. Bei Beschleunigungen weichen die Kräfte nach vorn, bei Verzögerungen nach hinten ab. Unter Zugrundelegung des Keplerschen Flächensatzes untersucht Newton nun die Bewegungen in Kegelschnitten und die Abhängigkeit der Zentripetalkraft von der Entfernung, um dann (Abschn. 8) beliebige Zentripetalkräfte zu betrachten. Im 2. Buche wird dann ein widerstehendes Mittel angenommen und der Widerstand proportional der Geschwindigkeit v oder auch v^2 gesetzt. Besonders interessant ist c. 4, § 21, wo die Bewegung auf einer Spirale behandelt wird, die alle radii vectores unter konstantem Winkel schneidet. In c. 5 wird die Zentralbewegung in Flüssigkeiten behandelt.

Während Newton bei diesen Ableitungen durchweg synthetisch verfährt und nur bei den Flüssigkeiten seine Fluxionsrechnung einmal anwendet, behandelt Euler auch die Zentralbewegung ausschließlich analytisch in einer großen Reihe von Arbeiten, die teils in den Petersburger, teils in den Berliner Akademieschriften veröffentlicht sind, worin auch die Präzession der Tag- und Nachtgleichen und die Nutation der Erdachse (Mém. de Berlin 5, p. 289, 1751) abgeleitet wird, ebenso die Reibung. Daneben ist auch in der Mechanik, 1736, und der Theoria motus 1765 der Zentralbewegung eine analytische Behandlung gewidmet. Euler geht aber über die einfache Zentralbewegung hinaus und begründet die allgemeinen Rotationsbewegungen und Bewegungen unter beliebigen Zwangsgesetzen im allgemeinen. Damit leitet er die moderne Kinematik und Kinetik ein und hat eine große Reihe von Entwicklungen bereits gegeben, die gewöhnlich späteren Forschern zugeschrieben werden. Schon in der Mechanik (1736) führt er die Vektorenrechnung ein, ohne den Namen zu geben, welche gewöhnlich Hamilton (1805—1865) zugeschrieben wird. In demselben Werke hat er auch schon die Methode des beweglichen Koordinatensystems angewandt. Ebenso hat er die Lagrangeschen (1736—1813) Bewegungsgleichungen (Mécanique analytique, 1789), und zwar beide Formen. Besonders hebe ich folgende Abhandlungen hervor: Du mouvement de rotation des corps solides autour d'un axe variable (Mém. de Berl. 14, p. 154, 1765, Fortsetzung: Mém.

de Berl. 16, p. 176, 1767); Formulae generales etc. (Nov. Com. Petrop. 20, p. 189, 1776) und Nova methodus motum corp. rig. determ. (ib. p. 208, 1776); De frictione corporum rotantium (ib. 6, p. 233, 1761).

Euler behandelt darin zuerst das Kreiselproblem analytisch. Vieles von dem, was noch heute bei dem Problem angewandt wird, stammt von ihm. Freilich hat er weder den Namen Vektor, noch spricht er von Vektoraddition, sondern von geometrischer Addition, auch hat er nicht den Namen Impuls, aber er hat den Begriff. Es kann nicht meine Aufgabe sein, die Entwicklung dieser Theorie schrittweise zu verfolgen; es würde das den Rahmen dieses Buches überschreiten. Aber es muß ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß Euler ganz systematisch die Rotation um eine feste Achse, um einen festen Punkt, um eine bewegliche Achse usw. behandelt hat. Er ist es auch, der zuerst erkannt hat, daß bei der Drehung um einen festen Punkt drei unabhängige Parameter zur Lösung des Problems ausreichen, daher seine unsymmetrischen Winkel (Introductio in analysin, 1748). Er behandelt auch zuerst den Fall, daß bei der Rotation die Gravitation ausgeschaltet wird, indem der Schwerpunkt als Unterstützungspunkt gewählt wird. In der theoria motus (1765) wird in dem Hauptteil, dem tractatus vom 2. bis 17. Kapitel eine allgemeine Theorie der Kreiselbewegung geboten unter Benutzung des Trägheitsmomentes und der Trägheitsachsen, im Supplement wird dann auch die Reibung ausführlich behandelt, doch sind auch die anderen von mir zitierten Abhandlungen zu beachten, da sie vieles enthalten, was später erst gewürdigt ist.

Auf geometrisch-synthetische Art hat Poinsot in éléments de statique 1803 und in Théorie nouvelle 1834 den Kreisel behandelt, während Hayward (On a direct method etc., Phil. Trans. Cambr. 1858, Bd. 10) sich wesentlich auf Euler stützt. Die weiteren Arbeiten in dieser Richtung haben ihren Abschluß gefunden in dem Werke: Über die Theorie des Kreisels von F. Klein und A. Sommerfeld, 1897—1910, worin alle späteren Arbeiten berücksichtigt und richtig zitiert sind. Ich verweise daher auf dies Werk.

Nur auf die Anwendung für die Erdforschung sei noch mit einigen Worten hingewiesen. Schon Huygens hatte (s. o.) auf die Veränderung der Beschleunigung durch die Schwerkraft und damit auf die variable Länge des Sekundenpendels an den Orten verschiedener Breite aufmerksam gemacht und die Theorie gegeben. Ausgeführt wurden diese Versuche jedoch nicht gleich; der erste

Versuch, das Pendel nun umgekehrt zur Bestimmung der Breite bzw. zur Bestimmung der Erdfigur zu benutzen, wurde von Bouguer (1698—1758) in Figure de la terre, 1749, p. 338, gemacht und bei der Gradmessung in Peru ausgeführt. Jedoch war seine Methode nicht so empfindlich, daß daraus genaue Werte errechnet werden konnten. Das leistete in erheblichem Maße die Beobachtungsmethode der Koinzidenzen von Borda (1733—1799) (Gilberts Ann. 57, p. 225, 1817). Eine Zusammenstellung seiner Versuche gibt Delambre in Base du système métrique, III, 1810. Sehr umfangreiche und genaue Messungen mit dem unveränderlichen Pendel hat Malaspina auf seiner Weltumsegelung angestellt, deren Resultate Altmann im Journ. für d. reine u. angewandte Mathematik, Bd. 4, p. 72, zusammenstellt. Die folgenden Messungen mit dem Reversionspendel sind schon erwähnt (s. o.). Aber durch Bessels Untersuchungen über die Länge des einfachen Sekundenpendels 1828 wurde erst der Grad der Genauigkeit erreicht, der die Pendelbeobachtungen zu der empfindlichsten Meßmethode machte für die Beschleunigung durch die Schwere. Eine Zusammenstellung der bis dahin vorliegenden Bestimmungen gab Listing in Nachricht. von d. k. Ges. der Wissenschaft zu Göttingen 1877, p. 797.

Wie umgekehrt aus solchen Beobachtungen die Gestalt der Erde bzw. die Größe der Abplattung gefunden werden kann, hat zuerst Clairaut (1713—1765) in seiner Théorie de la figure de la terre, 1743, p. 139, entwickelt, indem er für eine um eine Achse rotierende Flüssigkeit, welche die Form eines Rotationsellipsoids annimmt, die Gleichung ableitet: $G_{90} - G_0 = \frac{M}{a^2}\left(\frac{5}{2} m - \alpha\right)$; wo M die Gesamtmasse, a der Radius einer Kugel, die näherungsweise dem Ellipsoid gleich gesetzt werden kann $\left(\text{d. h. } \frac{M}{a^2} \text{ nahezu} = G_0\right)$, m das Verhältnis der äquatorialen Zentrifugalkraft zur Schwerkraft im Abstande a und $\alpha = \left(G_0 - G_{90} + \frac{5}{2}\omega^2 a\right) : G_0$ und $\omega =$ Winkelgeschwindigkeit bedeuten. Laplace dehnte diesen Satz auch auf feste rotierende Körper aus, wenn dieselben aus annähernd kugelförmigen Schichten gleicher Dichtigkeit bestehen. Endlich machte Stokes (1819—1903) den Satz unabhängig von einer Annahme über die Dichtigkeitsverteilung, indem er seine Gültigkeit bewies, wenn nur die auf die Gravitation allein und ebenso die auf die Resultante der Gravitation und der Zentrifugalkraft bezüglichen Gleichgewichtsflächen nahezu kugelförmig sind (Trans. of the Camb. Phil. Soc. 1849). Man ist also unter dieser Voraussetzung im-

stande, die wahre Gestalt der Meeresoberfläche allein durch Pendelbeobachtungen zu bestimmen. Es ist aber zu beachten, daß bei jener Clairautschen Formel die Glieder höherer Ordnung vernachlässigt sind. Will man genau verfahren, so muß man nach harmonischen Kugelfunktionen entwickeln, etwa nach Anleitung von Thomson und Tait, Theoretische Physik I_2, p. 353ff., 1874.

Die Erkenntnis, daß alle Bewegungsvorgänge auf der Erde durch die Rotation der Erde um ihre Achse beeinflußt werden, hat, wie oben bemerkt, schon Newton veranlaßt, dies Problem zu behandeln; er war aber nur zur Entwicklung des Falles gekommen, daß die Beschleunigung berechnet wurde für den Fall, daß die bewegliche Achse nur eine Translation erfährt. Clairaut hatte dann (l. c.) das Problem für die Ebene auch bei Drehung der Achse behandelt und die wirkliche Beschleunigung berechnet. Euler führt außer in der Mechanik und der Theoria motus die Aufgabe des Einflusses der Erdrotation weiter in den beiden Abhandlungen über die Rotation eines Körpers um variable und bewegliche Achsen (Mém. Berlin 14, p. 154, 1761 und ib. 16, p. 176, 1767). Aber in seiner ganzen Allgemeinheit wird die wahre Beschleunigung erst von Coriolis (Journ. de l'École Polyt. 24, p. 142, 1835) abgeleitet, indem er die relative Beschleunigung γ_r, die Beschleunigung durch die Verschiebung γ_v und die zusammengesetzte zentrifugale Beschleunigung γ_c als Vektoren addiert. Für die letztere findet er unter Vernachlässigung der Größen zweiter Ordnung, daß γ_c gleich ist dem doppelten Flächeninhalt des Parallelogramms aus Winkelgeschwindigkeit der Drehung ω und der relativen Geschwindigkeit v_r, also $= 2\,\omega \cdot v_r \sin(\omega, v_r)$, sie steht senkrecht auf der Fläche und ist in Richtung der Rotation des Systems zu nehmen. Daraus folgt, daß jede auf der nördlichen Hemisphäre stattfindende Bewegung eine Abweichung nach rechts, auf der südlichen nach links erfährt. Man spricht seitdem von den Corioliсschen Kräften, die als Zusatzkräfte bei jedem Bewegungsproblem in horizontaler Bahn hinzugefügt werden müssen.

Von großer Bedeutung wurde die Entdeckung der Erhaltung der Rotationsebene. Obwohl Copernikus den Parallelismus der Erdachse kannte, ist er doch nicht auf dies Gesetz gekommen, sondern nahm neben der Rotation und Revolution noch eine dritte als Deklination bezeichnete Bewegung hinzu (De revol. etc., deutsche Ausgabe von Menzzer, 1879, p. 29). Jedoch schon Gassendi (1592—1655) stellte in seiner Institutio astronomica 1645 die Sache richtig, indem er an das Beispiel des Kreisels erinnert und den Parallelismus der Erdachse als notwendige Folge der Rotation bezeichnet.

Eine Ausdehnung dieses Gesetzes der Erhaltung der Rotationsebene auf die Schwingungsebene eines Pendels hat Gassendi aber nicht ausgeführt. Wohl wirft er in einem Briefe an Naudé 1643 die Frage auf, ob die Drehung der Erde nicht einen Einfluß auf die Schwingungsebene des Pendels habe, allein seine Bemerkungen beziehen sich auf die ganz unpräzisen Beobachtungen eines gewissen Peirinsius, der ein periodisches Schwanken der Schwingungsebene des Pendels um den Meridian mit einer Periode von 6 Stunden beobachtet haben wollte (J. C. Lobkowitz, Perpendiculorum inconstantia etc., Lovanii 1643). Analytisch ist die Konstanz der Rotationsebene zuerst von Euler in der Arbeit: Du mouvement de rot. des corps solides autour d'une axe variable, wenn die Rotation mit drei Freiheitsgraden stattfindet, begründet (Abhandl. d. Berl. Acad. für 1758, p. 154, 1765) und auf die Schwingungsebene des Pendels ausgedehnt (Act. acad. scien. Petrop. 1779, II, p. 95). Unter den vielen Apparaten, welche neben den gewöhnlichen Kreiseln die Erhaltung der Rotationsebene demonstrieren sollen, ist der Bohnenbergersche Apparat (Beschreibung einer Maschine zur Erläuterung des Gesetzes der Umdrehung der Erde, 1817) wohl der verbreitetste. Eine Zusammenstellung der verschiedenen Einrichtungen findet sich bei Th. Gilbert, Les preuves mécaniques d. l. rot. de l. terre (Bull. des sc. math. et astr., Ser. 2, VI, p. 189). Daß die Reibung zu Schwankungen der Achse (Nutation) führt, hat für die Rotation des Kreisels ebenfalls Euler (l. c.) abgeleitet. Diese Schwankungen haben sachlich nichts zu tun mit der Schwankung der Erdachse, die durch die Schiefe des Ekliptik und die Abweichung von der Kugelform bedingt ist; sie wurde von Bradley (1692—1762) 1747 (31. Dez., Brief an Lord Macclesfield) festgestellt. Die Periode, in welcher die Achse des Kreisels den Kreiskegel durchläuft, ist auch bereits von Euler schon in der Mechanik III, § 839, und in der Theoria motus, § 711 u. 717—732 (p. 321) abgeleitet.

Ein Problem jedoch, welches schon seit längerer Zeit durch Beobachtungen sich aufgedrängt hatte und gerade damals in Berlin sehr akut war, die Abweichung der Geschosse von der gegebenen Richtung, war auch Eulers Analysis nicht gelungen zu lösen. Die Einführung der Spitzkugeln und der gezogenen Kanonen machte die Lösung dieses Problems immer dringlicher. Aber auch Poisson fand keine befriedigende Lösung in seinem großen Werke Recherch. s. l. mouvem. des projectiles dans l'air etc., 1839. Erst durch die Arbeit von Magnus (Pogg. Ann. 88, p. 1, 1853) wurden die Bedingungen festgestellt, von denen aus dies Problem zu lösen ist. Daß es nämlich

auf das Zusammenwirken der durch Rotation und Translationsbewegungen hervorgerufenen Luftströmungen ankam. In dieser Arbeit zeigt Magnus, wie durch einen rotierenden Zylinder in einem Luftstrom eine Druckdifferenz nach rechts und links entsteht, so daß, wenn der Zylinder translatorisch beweglich ist, er bei einer Rotation im Sinne des Uhrzeigers eine Abweichung nach links im Sinne der Luftströmung erfährt, bei Rotation im entgegengesetzten Sinne nach rechts. Das ist der sogenannte Magnuseffekt. Die moderne Aerodynamik, wie sie von Prandtl ausgebildet ist, hat dies Problem nun auch theoretisch aufgeklärt.

Die Anwendung des Gesetzes von der Erhaltung der Rotations- bzw. Schwingungsebene auf die Erdbewegung ist freilich bei Bohnenberger wohl angedeutet, aber nicht ausgeführt. Alle Versuche, eine „Vorgeschichte" des Foucaultschen Pendelversuchs zu finden, wie z. B. von S. Günther, haben kein Material geliefert, welches irgendwie mit Foucaults Idee in Verbindung zu bringen wäre. L. Foucault (1819—1868) stellte seinen Versuch 1850 an und zeigte, daß unter der Breite φ die Abweichung der Pendelschwingung vom Meridian für 1 Stunde $15^0 \cdot \sin\varphi$ betrage (Compt. rend. 32, p. 138, 1851). Wer den Versuch wiederholt hat, weiß, daß die gewöhnliche Foucaultsche Methode eine Fülle von Störungen enthält und daher die wirklich erhaltenen Werte mit den theoretischen nur in geringer Übereinstimmung sind. Von den überaus zahlreichen Arbeiten über diesen Versuch hebe ich nur die von Hansen (1795 bis 1874) hervor, welche sehr ausführlich auf die Fehlerquellen eingeht (Theorie der Pendelbewegung usw., Danzig 1853). Eine wesentliche Verbesserung der Methode lieferte, angeregt durch Kirchhoff, Kamerlingh Onnes (Nieuwe bewijzen voor de aswenteling der aarde, Groningen 1879), indem er ein festes Pendel cardanisch aufhängte und dasselbe in einem stark evakuierten Raume schwingen ließ. Auch die theoretische Ableitung, die Onnes gibt, ist beachtenswert, da sie Eulersche Gedanken weiterspinnt und die Lösung durch elliptische Transzendenten durchführt. Mit diesen Ideen hat sich schon Gauss (1777—1855) beschäftigt, so daß man Gauss als Vorläufer von Foucaults Idee bezeichnen müßte; aber Gauss hat die Arbeit nicht veröffentlicht und erst durch E. Schering (1833—1897) ist aus dem Nachlaß die Tatsache bekannt geworden, daß Gauss dieses Problem in der gleichen Richtung wie Onnes bearbeitet hat (Götting. gel. Anz. 1883, p. 71).

In Verfolg seines Pendelversuches ist Foucault dann auch dazu übergegangen, die Erhaltung der Rotationsebene beim

Kreisel für den Nachweis der Erddrehung dienstbar zu machen (Compt. rend. 35, p. 421, 1852), indem er in Anlehnung an Bohnenberger sein Gyroskop konstruierte, in welchem die im cardanischen Gehänge rotierende Kreiselscheibe durch an den Ringen angebrachte Schrauben und durch Aufhängung des Gestelles an einem torsionslosen Faden so eingestellt werden konnte, daß der Schwerpunkt des ganzen Systems gleichzeitig der Schnittpunkt der drei Drehungsachsen wird, also der Kreisel mit drei Freiheitsgraden rotiert. Dann zeigt die Achse des schwingenden Ringes stets nach demselben Punkt des Fixsternhimmels. Durch Festlegen eines Ringes des Gehänges läßt man dem Kreisel nur zwei Freiheitsgrade; dann hat die Achse der Kreiselscheibe die „Tendenz", sich der Achse der Erdrotation parallel zu stellen im gleichen Drehungssinne. Das cardanische Gehänge hat übrigens einen Vorläufer gehabt in dem Archimedesschen Gehänge, von dem wir leider nur durch Ovid Kenntnis haben (Ovid, fasti VI v. 277/78) und daher nicht entscheiden können, ob es genau so wie das cardanische konstruiert war; jedenfalls hatte es den gleichen Zweck.

Den gleichen Zweck verfolgte G. Sire mit seinem gyroskopischen Pendel (Archiv des scienc. phys. et natur. 1, p. 105, Genf 1858) und Gilbert mit seinem Barogyroskop (Ann. de la soc. scient. de Bruxelles 2, p. 189ff., 1878). Letzterer gibt auch eine Kritik und ausführliche Ableitung der Theorie (ib. 6 u. 7, 1881—1883). Die Beurteilung und theoretische Begründung dieser Apparate findet sich vollständig bei Klein und Sommerfeld, p. 731ff. Die technischen Anwendungen des Gesetzes von der Erhaltung der Schwingungs- bzw. Rotationsebene, wie sie bereits von Foucault (l. c.) für die Herstellung des Kreiselkompasses empfohlen waren, fallen zeitlich schon außerhalb der Endbegrenzung dieses Buches; ich verweise dafür auch auf Klein und Sommerfeld, p. 782ff. Besonders zu erwähnen sind die Versuche von A. Föppl (Über einen Kreiselversuch usw., München 1904) und M. Schulers Messungen (Festschrift zum 70. Geburtstage A. Föppls, p. 148, 1924).

Gravitationstheorie.

Daß das Pendel der zuverlässigste Apparat zur Bestimmung der Beschleunigung durch die Schwere ist, wurde oben schon ausgeführt. Es hat daher auch wesentliche Dienste geleistet für die Gravitationstheorie. Ich habe schon darauf aufmerksam gemacht, daß Kepler die gegenseitige Anziehung des Mondes und der Erde

identifiziert mit der zwischen dem fallenden Steine und der Erde wirkenden Schwere. In der Epitome IV, p. 511ff., dehnt er diese gegenseitige Anziehung auch auf alle Himmelskörper aus; wie sie alle der vis inertiae unterworfen sind, so auch der gegenseitigen Attraktion. Aber er war noch zu sehr im Banne der Gilbertschen Vorstellung (De magnete, 1600) von den magnetischen Effluvia der Himmelskörper, welche die Ursache der Rotation der Planeten um die Sonne sein sollte, als daß er sich ganz davon frei machen konnte. Daß Kepler für die gegenseitige Anziehung eine Proportionalität mit $m.m'/r$ glaubte ableiten zu können, hängt mit dieser Annahme der Effluvia zusammen. Ohne diese Effluvia spricht Borelli (1608—1679) die Ansicht aus, daß die Bewegung der Himmelskörper durch eine gegenseitige Attraktion erzeugt und erhalten bliebe; auch er spricht den Himmelskörpern die vis inertiae zu, aber es gelingt ihm nicht, das Attraktionsgesetz zu finden, da er auch nicht die Abhängigkeit von dem Quadrat der Entfernung einsetzt; auch die mathematischen Schwierigkeiten sind Borelli zu groß, so daß er nur die Vermutung aussprechen kann (Theoria mediceorum planetarum etc., Florenz 1666).

In demselben Jahre beginnen Newtons Untersuchungen über die Schwere, deren erstes Resultat am 28. 11. 1679 in dem Briefe an Hooke (1635—1703) über die Lotabweichung des fallenden Körpers ausgesprochen wurde. Hooke hatte sich bereits selbst mit diesen Fragen beschäftigt (An attempt to prove the motion of the earth., London 1674) und gründet sein Weltsystem auf drei Hypothesen: 1. Die Himmelskörper besitzen eine Anziehungskraft gegen ihren Mittelpunkt, aber auch innerhalb ihres Wirkungskreises gegeneinander. 2. Alle Körper, welche eine einfache, geradlinige Bewegung besitzen, bleiben in dieser, bis eine Kraft sie ablenkt und sie dann einen Kreis oder Ellipse oder eine mehr zusammengesetzte Kurve beschreiben. 3. Je näher die Himmelskörper einander kommen, um so stärker ihre Anziehung. Also ist Hookes Erkenntnis nicht über Kepler hinausgekommen und es bleibt Newtons unbeschränktes Verdienst, nicht nur statt der ersten Keplerschen Formel mit r die zweite mit r^2 gewählt zu haben, sondern nun auch ganz konsequent den Nachweis erbracht zu haben, daß, wenn ein Körper sich dauernd in einer Ellipse, Parabel oder Hyperbel bewegen soll unter dem Einfluß einer im Brennpunkt wirkenden Kraft, diese im umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Entfernung wirken muß und umgekehrt. Dann stellt er in Prop. 60 den Satz auf: Zwei Körper ziehen sich gegenseitig an mit Kräften,

welche dem Quadrat ihres Abstandes umgekehrt proportional sind, und bewegen sich um ihren gemeinschaftlichen Schwerpunkt; und Prop. 69: Die anziehenden Kräfte zweier Körper verhalten sich wie die Massen (Philos. naturalis principia mathem., Lond. 1687, p. 166 u. 190).

Im 3. Buche De mundi systemata gibt er dann die Anwendung auf die Bewegung in dem Planetensystem. Die darin ausgesprochenen Sätze hatte Newton schon 1683 der Roy. Soc. ohne Beweise zugesandt. In der zweiten, von Cotes besorgten Ausgabe ist gerade dies 3. Buch wesentlich erweitert in bezug auf die Mondtheorie. Mit der Gravitationstheorie leitet Newton das 2. und 3. Keplersche Gesetz ab und gibt eine vollständige Ableitung der Theorie von Ebbe und Flut. Er findet die Methode, aus drei Positionsbestimmungen die Bahn eines Kometen abzuleiten. Er wagt sich auch an das Dreikörperproblem (p. 133) innerhalb des Planetensystems (Sonne, Erde, Mond). In bezug auf die Ableitung aller dieser Sätze sei noch bemerkt, daß Newton der erste ist, der die Mechanik auf drei Axiome stützt: 1. das Trägheitsgesetz (Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum), 2. das Proportionalitätsgesetz zwischen Kraft und Wirkung (Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimatur), 3. das Prinzip der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung (Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem). Im übrigen will er nur geometrische Beweise zulassen. Allein gleich das erste Corol. ist mißglückt; er will da das Parallelogramm der Bewegungen ableiten. Das ist natürlich unmöglich, wie es Euler zuerst eingesehen hat. Das Gesetz ist entweder als reines Erfahrungsgesetz zu werten, oder als Folge des Postulats von der Vektorenaddition und -subtraktion, so macht es Euler in seiner Mechanik.

In Treatise of the system of the World in a popular way 1728, zieht Newton aus dem Gravitationsgesetz den Schluß, daß ein Berg das Lot ablenken würde, und berechnet diese Ablenkung für einen kegelförmigen Berg von 2500′ Höhe und 5000′ Durchmesser. Das veranlaßte Bouguer, am Chimborasso diese Ablenkung zu messen (La figure de la terre, Paris 1749, p. 364). Weil er Newton nicht erwähnt, wird er bisweilen als Erfinder dieser Methode genannt! Der gefundene Wert 7,5″ war ganz ungenügend. Auch die folgenden Messungen von Liesganig über den Einfluß der Alpen (Dimensio graduum meridiani Vien., etc. Wien 1770, p. 211) und von Maskelyne (Phil. Trans. 65, p. 500, und 68, p. 689,

1775), am Shehaltien, 1774, geben keine voll befriedigenden Werte. Aus diesen Messungen ergab sich eine Dichte der Erde zu 4,7, während Newton aus theoretischen Gründen d zwischen 5 und 6 angenommen hatte. Die Beobachtungen sind später von James wiederholt mit dem Ergebnis $d = 5{,}32$ (s. Wallentin im Humboldt 1, p. 214). Statt der Attraktion der Berge kann auch der Unterschied der Meereshöhe bei Ebbe und Flut in begrenzten Gebieten nach Struves Vorschlag benutzt werden; der Vorschlag von Robison, die Fundybay dazu zu benutzen (Elem. of mecan. phil., Edinb. 1822) ist meines Wissens nie ausgeführt.

Die Methode der Pendelbeobachtung, um damit die Erddichte zu messen, ist schon oben besprochen. Das Prinzip der Drehwage (Coulomb, Mém. d. l'Ac. 1784, p. 229, und 1785, p. 560) wurde von Cavendish (1731—1810) zuerst zur Bestimmung der Erddichte benutzt, indem er Bleikugeln von 158 kg ablenkend wirken ließ und aus dem Massenverhältnis dieser Kugeln zur Erde dann die Dichte der Erde zu 5,48 errechnete (Phil. Trans. 88, p. 469, 1798). Die Anregung zu diesen Versuchen verdankte Cavendish seinem Freunde John Michell (1724—1793), welcher bereits 1750 das Prinzip der Drehwage für magnetische Messungen vorgeschlagen hatte (A Treatise of artificial Magnets etc., Cambr. 1750) und in einer Arbeit (Phil. Trans. 1760) über die Erdbeben die Drehwage für Erddichtenuntersuchung ins Auge faßte. Zur Ausführung dieser Idee ist Micheil aber nicht gekommen und eine Theorie der Drehwage hat er nicht geliefert. Mit einer sehr vervollkommneten Drehwage mit Spiegelablesung stellte Reich 1837/38 Versuche an, welche 5,49 als Mittel ergaben (Versuche über die mittlere Dichtigkeit der Erde usw., Freiberg 1838). Dann folgte mit derselben Methode Baily (Experiments with the torsion rood etc., London 1843, p. 6), der aus etwa 2000 Beobachtungen den Wert 5,66 errechnete. Das veranlaßte Reich, mit größter Sorgfalt eine neue Reihe von Beobachtungen 1847—1850 anzustellen, deren Ergebnis 5,583 war (Abhandl. d. k. sächs. Ges. d. W., Leipzig 1852, I, p. 385); Cornu und Baille fanden mit der Drehwage 1873 Werte zwischen 5,50 und 5,56 (Compt. rend. 76, p. 954, 1873), durch die neueren Versuche von Boys, von Eötvös und Burgess ist der Wert nicht wesentlich verschoben, so daß als mittlere Dichte 5,5 festzustehen scheint.

Die empfindlichste Methode ist die durch Jolly ausgebildete mit der Wage. An den beiden Enden des Wagebalkens befinden sich je zwei Schalen übereinander, durch etwa 25 m lange Metall-

drähte miteinander verbunden, so daß ein Körper auf der oberen Schale leichter ist als auf der unteren; durch große Bleimassen, unter die untere Schale geschoben, kann man die Anziehung verstärken und die scheinbare Gewichtszunahme messen. Jolly fand auf diesem Wege die Dichtigkeit = 5,692 (Wied. Ann. 5, p. 112, 1878, und 14, p. 331, 1881). Nahezu gleichzeitig benutzte Poynting die gleiche Methode in elf Einzelbestimmungen, die aber sehr erheblich voneinander abwichen, deren Mittelwert jedoch dem Jollyschen entsprach (Proc. of the Roy. Soc. of London 38, p. 2). Weiter ausgebildet ist diese Methode durch A. König und Richarz (Wied. Ann. 24, p. 664, 1885) und zu einem Abschluß gebracht durch Richarz und Richard Menzel (Sitz.-Bericht Berlin, 1896; Wied. Ann. 66, p. 177, 1898) mit dem Wert 5,505 ± 0,009 qcm^{-3}.

Die Lehre vom Stoß.

Eine erfahrungsmäßige Kenntnis von der Wirkung des Stoßes ist sicher schon im ältesten Altertum bekannt gewesen, wie die mechanischen Vorrichtungen zum Einrammen von Pfählen beweisen. Physikalische Untersuchungen über den Stoß sind aus dem Altertum nicht bekannt. Das Jahr 1638 brachte drei Abhandlungen über den Stoß ans Licht. G. Baliani veröffentlichte in diesem Jahre De motu naturali gravium etc., Genua 1638, wo im 2. Buche vom Stoß gehandelt wird, aber da er keinen Unterschied macht zwischen elastischen und unelastischen Körpern kommt er zu keinem brauchbaren Resultat. Joh. Marcus Marci findet experimentell wohl, daß zwei Körper, von denen der eine ruht und durch einen zweiten gestoßen wird, zusammen weitergehen, aber auch für diesen Fall findet er kein Gesetz (De proportione motus). Galilei beschäftigt sich am 6. Tage seiner Discorsi e dimostrazioni etc. 1638 ausschließlich mit dem Stoß, bringt auch eine Reihe interessanter Experimente vor, aber findet doch keine Lösung des Problems, da auch er nicht elastischen Stoß von unelastischem unterscheidet und Druck und Stoß nicht scharf trennt; wohl spielt die Geschwindigkeit bei seinen Auseinandersetzungen eine Rolle, jedoch findet er nicht das Gesetz der Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Schon in Della scienza meccanica, die erst 1649 durch Viviani herausgegeben, aber schon durch Mersenne 1634 ins Französische unter dem Titel La mecanique de Galilée (Paris) übersetzt war, hatte Galilei den Satz aufgestellt, daß sich die Energie des Stoßes, den ein Körper ausübt, auch nach dem getroffenen Körper richtet.

Der gleiche Gedanke war auch am 4. Tage der Discorsi wiedergekehrt mit dem Zahlenbeispiel, daß, wenn zwei Körper, deren einer mit der Geschwindigkeit 10° den anderen mit der Geschwindigkeit 4° trifft, so ist der Stoß 6° (p. 101, l. c.). Er sagt wohl, die Intensität der Energie hänge von dem Gewicht und der Geschwindigkeit ab, doch gelingt es ihm nicht, den elastischen vom unelastischen Stoß zu trennen. Er will auch den Stoß in eine Summe von Elementarimpulsen zerlegen, aber auch diese Idee ist bei ihm unfruchtbar geblieben.

Descartes (1596—1650) versucht in Principia philos. Amst. 1644, den Stoß allgemein zu behandeln, indem er (II, § 45—52) sieben Fälle des Stoßes unterscheidet: Zwei Körper bewegen sich gegeneinander bei gleicher Größe und gleicher Geschwindigkeit, bei verschiedener Größe und gleicher Geschwindigkeit, bei gleicher Größe und verschiedener Geschwindigkeit, der eine ruht, aber die Größen der Körper sind gleich oder verschieden, endlich die Körper bewegen sich in gleicher Richtung. Für alle gilt ihm der Grundsatz, daß die Bewegungsgröße erhalten bleibt; unter Bewegungsgröße versteht er das Produkt aus Gewicht mit der Geschwindigkeit (den Begriff Masse hat Descartes noch nicht). Er unterscheidet auch nicht elastische und unelastische Körper, darum sind seine Resultate, je nach dieser Unterscheidung, richtig oder falsch.

Es war daher begreiflich, daß die Roy. Soc. 1668 zu einer Lösung der Perkussion aufforderte. Die drei eingereichten und in den Phil. Trans. 1669 veröffentlichten Arbeiten rührten von Wallis, Wren und Huygens her. John Wallis (1616—1703) behandelte den Stoß unelastischer Körper und setzt die Erhaltung der Bewegungsgröße voraus. Er findet das Gesetz $(m + m')\,v'' = m \cdot v + m' \cdot v'$. In seinen gesammelten Werken (I, p. 1002, 1695) hat er den Stoß elastischer Körper hinzugefügt. Chr. Wren (1632—1723), der Erbauer der St.-Pauls-Kathedrale, behandelt nur den elastischen, zentralen Stoß in einer Reihe von Sätzen, die er ohne Beweis ausspricht, deren Richtigkeit er durch Beobachtung an pendelnd aufgehängten Massen erkannt hat, und die in der Gleichung zusammengefaßt werden können $C = \frac{M \cdot V + m \cdot v - m(V - v)}{M + m}$, wenn C die Geschwindigkeit von M nach dem Stoße ist, analog die Geschwindigkeit c für den Körper m, wobei die Elastizität als vollkommen angesehen ist, d. h. der Elastizitätskoeffizient ist nahezu 1. Chr. Huygens (1629—1695) lieferte zu der ersten Bearbeitung noch eine Ergänzung (1669) und hat später beide zusammengefaßt

und zu einer vollständigen Theorie vom Stoß erweitert in De motu corporum ex percussione hinterlassen. Er geht von dem Axiom aus: Wenn zwei gleiche Körper mit gleichen Geschwindigkeiten zentrisch aufeinander stoßen, so prallen sie symmetrisch mit gleicher Geschwindigkeit wieder ab. Bei der Ableitung der Resultate bedient sich Huygens zuerst der Methode der scheinbaren Bewegung. Er setzt ferner unbewiesen voraus, daß der größere bewegte Körper dem kleineren unbewegten von seiner Bewegung mitteilt.

Von besonderem Interesse ist, daß er in Prop. XI dann auch für den Stoß das Gesetz der Erhaltung der lebendigen Kraft in der Form ausspricht, daß die Summe der Produkte der Massen in die Quadrate der zugehörigen Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß konstant sind. Da in der ersten Abhandlung dieser Gedanke nicht vorkommt und die zusammenfassende Arbeit erst 1703 erschien, kann natürlich nicht davon die Rede sein, Huygens die Priorität vor Leibniz zuzusprechen. Im Gegenteil hat Huygens schon vor der Leibnizschen Veröffentlichung brieflich von ihm die Kenntnis des Gesetzes erhalten.

Ausgedehnte und erfolgreiche experimentelle Untersuchungen über den Stoß stellten Mariotte (1620—1684) an, die erst nach seinem Tode in den Oeuvres (Leiden 1717) unter dem Titel: Traité de la percussion ou choc des corps, veröffentlicht sind, darin die Beschreibung der auch heute noch oft gebrauchten Perkussionsmaschine, darin auch die auf der Pariser Sternwarte bei einer Fallhöhe von 166′ angestellten Fallversuche. An den Huygensschen Stoßgesetzen ist wenig geändert. Wenn, wie es in der Wirklichkeit stets der Fall ist, keine vollkommene Elastizität vorhanden ist, so muß in der eben mitgeteilten Huygensschen Formel das subtraktive Glied des Zählers mit dem Elastizitätsmodul multipliziert werden.

Die Lehre vom Stoß ist analytisch ausführlich behandelt von L. Euler in De la force de percussion etc. (Mém. de l'acad. d. Berlin 1746, p. 21) und damit die Abhängigkeit dieses Problems von einem allgemeinen, eben der Elastizität, angezeigt. Es handelt sich daher jetzt darum, die Elastizität so zu entwickeln, daß die experimentellen Ergebnisse der Stoßbeobachtungen daraus abgeleitet werden können. Die ersten Versuche, von hier aus das Problem zu lösen, sind die von Poisson (Traité de mécan. 2, p. 331, 1816) und von Cauchy (1789—1857) (Bull. de la soc. phil. 1826, p. 180); sie behandelten den Stoß elastischer, zylindrischer Stäbe. Dabei zeigte sich, daß die Zeitdauer des Stoßes eine wichtige Rolle spiele.

Diese zu messen, lehrte die Methode von Pouillet (Pogg. Ann. 64, p. 452, 1845). Ausgedehnte Versuche in dieser Richtung stellte Schneebeli mit Stahlzylindern und Stahlkugeln an (Pogg. Ann. 143, p. 239, 1871) und erweiterte diese über Stoß von Kugeln aus verschiedenen Metallen (ib. 145, p. 328, 1872). Seine eigene Theorie hat sich schon bei seinen eigenen Versuchen nicht bewährt.

Den Cauchyschen Gedanken nahm wieder auf St. Venant (Lionvilles Journ. 12, p. 237, 1867). Er zeigte Poissons Fehler und versuchte besonders den Einfluß der Rückkehr der im stoßenden Stabe entstehenden longitudinalen Wellen aufzudecken. Die Untersuchungen von W. Voigt (Sitz.-Ber. d. Berlin. Acad. 1882, p. 683, und Wied. Ann. 19, p. 44, 1883) zeigten, daß die Theorie mit den Experimenten durchaus in Widerspruch stand. Daraufhin ist dann das Elastizitätsproblem von neuem aufgenommen von Neumann in seiner „Theorie der Elastizität" 1885, p. 332, und von Voigt (l. c.). Beide beziehen sich auf Stäbe bzw. Zylinder. Für Kugeln ist die Untersuchung von H. Hertz (Borchardts Journ. 91, p. 170, und 92, p. 156, 1882) durchgeführt. Experimentelle Prüfung durch Hamburger (Wied. Ann. 28, p. 653, 1886) hat gute Übereinstimmung der Hertzschen Theorie mit den Beobachtungen an Messingkugeln gegeben. Jedoch ist diese Frage noch nicht abgeschlossen.

Elastizität.

Die Elastizität ist technisch natürlich seit Menschen Bogen zum Schießen gebrauchten bekannt gewesen. Der wissenschaftliche Begriff der Elastizität ist zuerst von Hooke geformt (Phil. tract. and collections, London 1679); er bemerkt bereits, daß man die allgemeine Elastizität, welche bedeutet, daß ein Körper nach Aufhören einer auf ihn wirkenden Kraft seine ursprüngliche Form und sein Volumen wieder annimmt, besonders betrachten müsse, je nachdem die Kraft in einem Zuge, einem Druck, oder einer Biegung bestehe. Er stellt die beiden Gesetze auf: 1. ut tensio, sic vis, d. h. die elastische Kraft ist der Deformation proportional, und 2. die elastische Kraft ist dieselbe, wenn die angreifende Kraft entgegengesetzt gerichtet wirkt, also Zugelastizität = Druckelastizität. Der letztere Satz war schon von Leonardo da Vinci bei seinem Feder-Dynamometer erkannt (Cod. Atlant.). Experimentelle Prüfung der Zugelastizität und Druckelastizität hat wohl zuerst W. J. s'Gravesande (1688—1742) in seinen Physicae Elementa mathem., Leiden 1734, ausgeführt und besonders das erste Hookesche

Gesetz bestätigt. L. Euler hat sich mit der Druckelastizität in Verbindung mit der Festigkeit in mehreren Arbeiten beschäftigt und besonders die „Elastizitätsgrenze“ dabei festgestellt (Mém. d. Berlin 13, p. 252, 1759; Acta acad. Petropol. 1778 I, p. 121, 146, 163, 1780). Die übrigen Arbeiten Eulers über schwingende Saiten und Platten, welche ebenfalls mit der Elastizität zu tun haben, gehören in das Gebiet der Akustik, wie auch die ähnlichen von D. Bernoulli.

Eine wesentliche Förderung der Lehre von der Zugelastizität findet sich bei Th. Young (1773—1829) in Curse of lectures on nat. Phil., London 1807. Er stellt fest: 1. Die Verlängerungen eines Drahtes sind bei demselben angehängten Gewicht der Länge des Drahtes proportional; 2. die Verlängerung eines gegebenen Drahtes ist dem spannenden Gewicht proportional; 3. die Verlängerung verschieden dicker Drähte desselben Materials ist bei gleichen spannenden Gewichten dem Querschnitt ungekehrt proportional, aber unabhängig von der Form des Querschnittes; 4. die Verlängerung ist abhängig von der Materie des Drahtes, d. h. wenn l die Länge des Drahtes, q der Querschnitt, p das spannende Gewicht, v die Verlängerung und c die Materialkonstante bedeutet, so ist $v = c \cdot p \cdot l / q$, oder wenn $\frac{p}{q}$, die für die Querschnittseinheit wirksame Kraft, $= K$, und $\frac{v}{l}$, die Verlängerung der Längeneinheit, $= \delta$ gesetzt wird, so ist $K = \frac{1}{c} \delta$; den Quotienten $\frac{1}{c}$ nennt Young den Elastizitätsmodul, er ist also der reziproke Wert der Verlängerung eines Stabes von der Länge 1, wenn auf die Einheit des Querschnitts die Gewichtseinheit wirkt.

Diese Youngschen Ergebnisse sind von einer großen Zahl Experimentatoren an verschiedenen Substanzen geprüft; ich erwähne nur die ausgedehnten Versuche von Lagerhjelm, der auch die akustische Methode zum Vergleich heranzieht in K. Vetensk. Acad. Handling. 1827 (und Pogg. Ann. 13, p. 404, 1828) und auch die Resultate früherer Experimentatoren angibt. Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, daß von besonderem Interesse das Verhältnis der Querkontraktion zur Längendilatation ist. Ist δ die Verlängerung der Längeneinheit, so sei die Verkürzung des Querdurchmessers $\mu . \delta$. Da glaubten nun die französischen Physiker Navier (Mém. d. Paris 7), Poisson (ib. 8), Lamé und Clapeyron (Crelles Journ. 7), den Nachweis erbringen zu können,

daß $\mu = \frac{1}{4}$ sei. Aber Cauchy (Exercices de Mathem., T. 3, p. 182 u. 205, 1828) und besonders Kirchhoff (Crelles Journ. Bde. 40 u. 56, sowie experimentell Pogg. Ann. 108, p. 369, 1859) haben gezeigt, daß μ zwischen 0 und $\frac{1}{2}$ liegt. Dazu stimmen auch die Versuche von Wertheim (Pogg. Ann. 78, p. 381, 1849 u. Erg.-Bd. 2, p. 8, 1848). Auch die späteren Untersuchungen haben das Problem nicht zum Abschluß gebracht.

Torsionselastizität. Michell hatte bei seiner primitiven Drehwage (s. oben) einfach vorausgesetzt, daß Proportionalität zwischen der Torsionskraft und dem Torsionswinkel bestehe und daher die Stärke der magnetischen Abstoßung proportional dem Winkel gesetzt. Er war also auf das eigentliche Problem der Drehwage gar nicht eingegangen. Das tat erst Coulomb (1736—1806), als er bei seiner Lösung der Preisaufgabe über die beste Form des Schiffskompasses den Magneten an einem Seidenfaden aufgehängt hatte und nun erkannte, daß die Torsion des Fadens das entscheidende Moment sei (1779, Mém. des sav. étrang., Bd. 9). Coulomb zeigte zunächst, daß die Schwingungsdauer eines an einem Faden aufgehangenen Kreiszylinders $t = \left(\int \frac{\pi r^2}{n}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot 180^0$ ist, wo $\int \pi r^2$ das Trägheitsmoment, n der Torsionskoeffizient ist (Mém. de l'Acad. 1784, p. 229ff). Den Torsionskoeffizienten definiert Coulomb als das Gewicht, welches am Hebelarm von der Länge 1 ziehend, dem Drahte die Drehung 1, d. h. den Drehungswinkel $57^0\,17'\,44{,}8''$ gibt. Für den vertikalen Kreiszylinder ist $\int \pi r^2 = \frac{Mr^2}{2}$, wenn M die Masse ist, also $t = \pi \sqrt{\frac{Mr^2}{2n}}$, so kann er n durch Schwingungsbeobachtungen bestimmen. Coulomb zeigte nun, daß die Oszillationsdauer von der Amplitude unabhängig ist und daß zweitens die Torsionskraft des Fadens unabhängig von dem spannenden Gewichte sei. Für die Torsionskraft ergibt sich, daß sie für zylindrische Drähte proportional der vierten Potenz des Radius des Drahtes, umgekehrt proportional der Länge des Drahtes und proportional dem Torsionswinkel ist. Bei prismatischen treten wegen der inneren Verschiebung weitläufigere Beziehungen ein. Coulomb hat seine Untersuchung schon auf verschiedene Substanzen der Drähte ausgedehnt, wobei sich ergab, daß der Torsionsmodul für die meisten Substanzen etwa ein Fünftel des Elastizitätsmoduls ist. Zunächst zeigte sich, daß die Unabhängigkeit von

dem spannenden Gewicht verschwindet, wenn man gedrehte Seidenfäden nimmt. Gauss zeigte (Intensitas vis magnet. terr. 1833, § 9, Werke V, p. 94), daß der Torsionskoeffizient mit dem spannenden Gewicht bei solchen Fäden zunimmt. Für Metallfäden fand Reich (Neue Versuche mit der Drehwage, Leipzig 1852, p. 406), daß ein frei hängender Metalldraht sich langsam aber dauernd nach einer Seite dreht.

Ausgedehnte Versuche über die Torsion mit Hilfe ziehender Gewichte an horizontal eingespannten Stäben hat Wertheim angestellt (Ann. de chim. et de phys. III. S., 50, p. 202, 1857), doch eignet sich diese Methode mehr für Stäbe als für Drähte und ist nicht so empfindlich wie die Coulombsche. Mit letzterer haben Kohlrausch und Loomis den Einfluß der Temperatur genauer untersucht, den auch Wertheim beachtet hatte; sie finden, daß der Torsionskoeffizient wie auch der Elastizitätsmodul mit steigender Temperatur kleiner wird. Sie finden $E_c = E_0\ (1 - a\,t - b\,t^2)$, wo a und b für die verschiedenen Substanzen besondere Konstanten sind (Pogg. Ann. 141, p. 481, 1870).

Biegungselastizität.

Die Biegungselastizität ist andeutungsweise schon in Herons Untersuchungen über die Bruchfestigkeit enthalten (Mechanik, Opera II, p. 70, 86 u. 178). Galilei kommt nicht wesentlich über Heron hinaus, dem er sich eng anschließt (Discorsi, deutsch Ostw. Klass. 11, p. 98). Daß die Biegungselastizität auch bei schwingenden Seilen maßgebend ist, wurde wohl zuerst von Jacob Bernoulli und L. Euler klar erkannt (Nov. Com. Petrop. 19, p. 340, 1775). Doch gehören diese Untersuchungen mehr in das Gebiet der Akustik. Versuche über die Biegung einseitig eingeklemmter Stäbe sind in ausgedehntem Maße von Gerstner (Handbuch der Mechanik, Bd. 1) mitgeteilt. Aus allen dort mitgeteilten Versuchen folgt, daß die Biegung dem biegenden Gewicht proportional ist, also auch die Elastizität, und zwar ist dieselbe proportional der dritten Potenz der Länge, umgekehrt proportional der Breite, und der dritten Potenz der Höhe und umgekehrt proportional dem Elastizitätskoeffizienten. Ebenso muß die Elastizität bei einem zweiseitig aufgelegten Stabe von den angegebenen Größen abhängig sein, wie Saint Vénant in Lionvilles Journ. II, p. 1, 1856, nachgewiesen hat. Eine theoretische Ableitung und experimentelle Prüfung findet sich in Clebsch' Theorie der Elastizität fester Körper, 1868, p. 87, 363). Weiter-

gehende allgemeine Gesetze sind noch nicht für die Elastizität gefunden; es handelt sich in den zahlreichen Untersuchungen durchweg um spezielle Fälle.

Eine ebenfalls allen Wirkungen der Elastizität gemeinsame Eigenschaft ist die der Nachwirkung, d. h. der durch die deformierenden Kräfte erzeugte Zustand tritt nicht momentan auf, sondern bedarf Zeit, sowohl bei der Herstellung der der wirkenden Kraft entsprechenden Form, wie bei der Wiederherstellung der ursprünglichen Form, das ist die Nachwirkung. Es tritt aber bei keinem festen Körper eine völlige Wiederherstellung ein, sondern es bleibt ein dauernder Unterschied, das ist die Hysteresis. Die Nachwirkung ist von Wilh. Weber entdeckt bei den erdmagnetischen Untersuchungen; er gibt auch eine Theorie, wonach die Drehung der kleinsten Teile um ihren Schwerpunkt die Ursache ist (Pogg. Ann. 34, p. 250, 1835, für Seidenfäden und ib. 54, p. 9, 1841 für feste Körper im allgemeinen). Diese atomistische Theorie wurde bestätigt durch zahlreiche Versuche verschiedener Experimentatoren, cf. Pogg. Ann. 72, p. 393, 1847 für Glasfäden, ib. 119, p. 337, 1863, für Metalldrähte, die Untersuchungen von Fr. Kohlrausch (1840 bis 1910) über Silberdrähte, Kautschuk und Glasfäden ib. 128, p. 7, 207, 399, 1866, ib. 158, p. 338, 1876, von Braun ib. 159, p. 337, 1876. Eine Verbindung der Weberschen Vorstellungen mit der mechanischen Wärmetheorie begründete Warburg (Wied. Ann. 4, p. 232, 1878).

Eine nicht atomistische Theorie stellte Boltzmann (1844 bis 1906) auf (Sitzungsber. Wien 70, 1874; Pogg. Ann. 7, p. 627, 1876); eine andere von Neesen (Pogg. Ann. 153, p. 498 u. 576, 1874; ib. 157, p. 584, 1876) wendet sich gegen Boltzmanns Theorie; ausführlichere Kritik der bisherigen Theorien und Rechtfertigung der Weberschen Grundvorstellung gibt O. E. Meyer (Wied. Ann. 4, p. 249, 1878). Auch die Theorie von Cl. Maxwell (Phil. Trans. 157, p. 52, 1867; Scient. Papers 2, p. 30, 1890) nimmt die Webersche Grundvorstellung auf und versucht, allgemeine Gleichungen zu gewinnen, die auch die Temperatur berücksichtigen. Der Einfluß der Temperatur war von F. Kohlrausch (l. c.) bereits nachgewiesen und ist nach den Untersuchungen Himstedts über gleichzeitige Torsion und Dehnung von sehr großer Bedeutung (Wied. Ann. 17, p. 709, 1882). Auch die Beobachtungen von Streintz (Sitzungsber. d. Wien. Acad. 69, p. 337, 1874) und von Pisati (Gazetta chim. Ital. 6, p. 23, 1876, und 7, p. 173, 1877) zeigen, daß das logarithmische Decrement bei Torsionsschwingungen von Drähten mit steigender Temperatur zunimmt. Eine ausführliche und einst-

weilen abschließende Untersuchung über diesen Temperatureinfluß hat Th. Schröder gegeben, welcher die Vorstellungen von Kohlrausch und Warburg im wesentlichen bestätigte (Wied. Ann. 28, p. 369, 1886). Daß die rein theoretische Behandlung, wie sie z. B. auch von Wiechert (Wied. Ann. 50, p. 335 u. 546, 1893) versucht ist, nicht allgemein befriedigende Resultate lieferte, erklärt sich daraus, daß diese Frage eng zusammenhängt mit dem Aufbau der Materie, speziell der festen Körper. Das ist aber gegenwärtig das Hauptproblem der Forschung und wird es vermutlich noch recht lange sein. Je nach der Anschauung, welche wir über diesen Aufbau gewinnen, wird die Theorie der elastischen Nachwirkung sowohl, wie auch die Theorie der Elastizität selbst verschiedene Wege einschlagen. Zurzeit darf man wohl behaupten, daß die ursprüngliche Auffassung von W. Weber in der Richtung liegt, die die gegenwärtige Forschung verfolgt.

Festigkeit.

Mit der Elastizität steht in einigem Zusammenhang die Festigkeit, und mehrere der Arbeiten über Elastizität haben sich auch mit dieser Frage beschäftigt, der schon Archimedes (s. o.) und Galilei (s. o.) ihr Interesse zuwandten. Ebenso ist in den zitierten Eulerschen Arbeiten auch die Festigkeit behandelt, und darin ist gezeigt, daß das Maß der Zug- und Druckfestigkeit von dem der Elastizitätsgrenze wesentlich verschieden ist. Während die Elastizitätsgrenze das Gewicht (Druck) angibt, bei welchem dauernde Deformation eintritt, ist die Grenze der Festigkeit das Gewicht, bei welchem Zerreißen bzw. Bruch eintritt. Ein allgemeines Gesetz gibt es nicht für diese Grenze, ebensowenig ein allgemeines Gesetz über den Abstand der Elastizitätsgrenze von der Festigkeitsgrenze, der bisweilen als Maß der Dehnbarkeit (irrtümlich) angegeben wird. Die Untersuchung dieser Festigkeit ist also immer nur speziell zu führen und hat wesentlich technisches Interesse. Darum übergehe ich die Arbeiten hierüber. Auch die Frage nach der Härte der festen Körper ist weniger physikalisch wertvoll als mineralogisch. Ich erwähne daher nur, daß die bis heute übliche Härteskala von Mohs (Grundriß der Mineralogie, Dresden 1822) aufgestellt ist: Talk, Gips, Kalkspat, Flußspat, Apatit, Feldspat, Quarz, Topas, Korund (Schmirgel), Diamant, bei welchen stets der vorhergehende Körper durch den folgenden geritzt werden kann. Spätere Versuche, andere Skalen einzuführen, haben keinen allgemeinen Erfolg gehabt und haben in dieser Zeitepoche kein physikalisches Interesse.

Die Entwicklung der fundamentalen Begriffe: Kraft, Masse und Arbeit.

Die Kraft ist in den uns erhaltenen Werken des klassischen Altertums stets in Analogie der tierischen Muskelkraft gebraucht, als Ursache einer Wirkung; welcher Art die Wirkung war, wird dabei nicht näher bezeichnet. Mit dem Erwachen der physikalischen Forschung am Ausgang des 16. Jahrhunderts setzt das Ringen um den Kraft-, den Masse- und den Energiebegriff ein. Der erste, der in diesem Sinne neue Bahnen zu gehen sich bemüht, ist wieder Kepler. In seinem Prodromus 1596 steht er noch auf dem Platonischen Standpunkt, daß die Kraft als eine nicht sinnlich wahrnehmbare Ursache alles Geschehens anzusehen sei und in Analogie zum Lebewesen als eine Anima zu behandeln sei. Er sowohl wie Platon sind sich durchaus bewußt, daß es nur eine Analogie ist, wenn sie von einer Anima (ψυχή) reden, sie wollen nur die Immaterialität ausdrücken. Es ist nun sehr bezeichnend für dies Bestreben, eine begriffliche Definition der Kraft zu geben, daß selbst Biot noch in der zweiten Auflage seines Lehrbuchs der Physik 1828 (deutsche Bearbeitung I, p. 20) sich über die Molekularkräfte so ausspricht: „Im Verfolg dieses Werkes wird sich ergeben, daß dieser Zustand (Aggregatzustand) durch Naturkräfte hervorgebracht und erhalten wird, durch die alle Körperteilchen belebt (animées) sind“ usw. Man wird also gut tun, weder Kepler noch Galilei noch Archimedes noch Platon aus der Anwendung des Wortes Anima (ψύχη) einen Strick zu drehen. Schon in der astronomia nova nennt Kepler die Ursache der Bewegung vis und besonders in der Epitome 1618, p. 109, behandelt er diese causa motus eingehender. Er führt da als Maß der Kraft die Größe (intensitas) der hervorgerufenen Bewegung ein, aber er mißt die Bewegung durch die Geschwindigkeit. Interessant ist es, bei Galilei dies Ringen mit dem Kraftbegriff zu verfolgen. Zunächst ist ihm die Kraft auch nur ein unbestimmter Ausdruck für die Ursache irgendeiner Veränderung in der Welt. Auch er kennt die animistische Analogie. In den Discorsi ist in den Unterhandlungen des ersten und zweiten Tages Kraft einfach gleich Gewicht; er setzt ganz nach Belieben beide Ausdrücke füreinander ein. Aber in den Entwicklungen des dritten und vierten Tages wird es klar. Er unterscheidet nun „Impuls“ und Kraft. Den Impuls mißt er nach der erteilten Anfangsgeschwindigkeit (deutsche Ausgabe p. 109), während das Maß der Kraft die Beschleunigung ist. Da kommt er also über

Kepler hinaus; bei Kepler ist die Formel $k = i \cdot v$; bei Galilei $k = i \cdot b$, wenn k die Kraft, i die Trägheit des Körpers, v die Geschwindigkeit und b die Beschleunigung ist. Es ist nun sehr bezeichnend, daß Newton diese klare Unterscheidung nicht hat, seine 4. Definition lautet: Vis impressa est actio in corpus exercita, ad mutandum ejus statum vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum; demgemäß macht er die Unterteilung: die Stoßkraft, der Druck und die Zentripetalkraft. Erst bei Euler in der Mechanik 1736 kehrt die präzise Definition wieder, und nicht erst bei Lagrange, dem sie oft zugeschrieben wird, der sie aber ohne Zitat von Euler übernommen hat.

Der Begriff der Masse ist noch viel langsamer herausgebildet. Obwohl Kepler die vis inertiae als das Maß des Körpers, d. h. die Masse einführt und Galilei ebenfalls in den Discorsi die inertia als das Wesentliche des Körpers bezeichnet, kommt doch immer wieder eine Gleichsetzung der Materie mit der Masse vor, so bei Galilei, bei Descartes, bei Newton, oder auch die Gleichsetzung von Masse und Gewicht. Sehr viel klarer ist der Begriff bei Huygens in De motu corporum ex percussione, 1668, wo er im 9. Satze sagt, daß bei elastischen Körpern die Summe der Produkte aus Massen in das Quadrat der zugehörigen Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß gleich bleibt. Dieser Satz war speziell gegen die Descartessche Naturphilosophie gerichtet, die damals in Frankreich und England unbestritten herrschte. Bei Descartes ist die Verwechslung ganz besonders deutlich. In § 36 seiner principia philosophiae 1644 setzt er auseinander, daß die Materie kraftlos gedacht werden müsse, erst durch eine äußere Ursache könne ihr Bewegungszustand geändert werden; daraus folge, daß die Größe der Bewegung in der Welt konstant sei, das Maß dieser Bewegung sei die „Bewegungsgröße" und sei das Produkt aus Masse mal Geschwindigkeit, aber für Masse setzt er nun stets Gewichte ein (§ 43). Es ist aber verdienstlich, daß Descartes ebenda die Beziehung findet, daß die Bewegungsgröße gleich dem Produkt aus Kraft und Zeit ist, also $m \cdot v = k \cdot t$. Dies Produkt nennt er Kraftantrieb. Auch Newton übernimmt (l. c., p. 2) die Bewegungsgröße als Maß für die Bewegung. Eine eigenartige Definition für Masse stellt Newton an die Spitze seiner Entwicklung: Masse ist das Produkt aus Dichte und Volumen. Da die Dichte nicht vorher und selbständig auch nachher nicht definiert ist, haben wir hier einen Zirkelschluß; denn Dichte wird wiederum als der Quotient aus Masse und Volumen, oder als die Masse der Volumeneinheit definiert.

Obwohl bei Euler (theoria motus) die Masse als der dem bewegten Körper eigentümliche Faktor eingeführt wird, mit welchem die Beschleunigung zu multiplizieren ist, um die in der Richtung der Beschleunigung liegende Kraft zu geben, wie es dann von Lagrange übernommen ist, hat man immer wieder versucht, für Kraft eine sinnlich vorstellbare Definition zu geben. So sagt Biot (l. c., p. 83), die Menge solcher Teilchen (materielle Punkte oder Moleküle) ist die Masse des Körpers. Die konsequente Definition der Masse wurde erst durch C. F. Gauss' (1777—1855) Einführung des auf Länge, Zeit, und Masse gegründeten absoluten Maßsystems Allgemeingut der Physiker, obwohl noch heute Lehrbücher genug vorhanden sind, welche Masse und Materie identifizieren.

Erst durch den richtigen Massebegriff war es möglich, auch den Kraftbegriff präziser zu fassen. Newton hat in den Definitionen 5—8 unterschieden absolute, beschleunigende und bewegende Kraft, aber für die absolute Kraft hat er in der folgenden Entwicklung keine Verwendung. Die Unterscheidung der beschleunigenden und bewegenden Kraft ist jedoch vielfach beibehalten, so daß die beschleunigende Kraft gleich der Beschleunigung gesetzt wird, während die bewegende Kraft das Produkt aus Masse mal Beschleunigung ist (cf. Gauss, Intensitas vis magn. terr. 1833, p. 8; Kirchhoff, Vorlesungen über math. Physik, Mechanik, 3. Aufl. 1883, p. 5 u. 22). Daß die Newtonsche absolute Kraft ein Phantasiegebilde ist, wurde freilich wohl schon von ihm selbst erkannt, daß jedoch zu einer Kraftwirkung stets zwei Dinge gehören, ist erst spät präzise ausgesprochen. Clerk Maxwell (1831—1879) definiert in Matter and motion (deutsche Ausgabe, p. 92): „Kraft ist eine Seite jener gegenseitigen Wirkung zwischen zwei Körpern, welche nach Newton Wirkung und Rückwirkung genannt wurde und welche wir jetzt kurz durch das einzige Wort stress bezeichnen. . . . Wenn wir aber unsere Aufmerksamkeit auf den einen der materiellen Teile beschränken, dann sehen wir die Sache so an, als wäre nur eine einseitige Wirkung da, diejenige nämlich, welche den von uns in Betracht genommenen Teil beeinflußt, und wir nennen die Erscheinung rücksichtlich ihrer Wirkung eine äußere Kraft, welche auf unseren materiellen Teil wirkt.“ Ähnlich so sagt Rankine (1820—1872): Die Kraft ist eine Wirkung zweier Körper, die eine Änderung ihrer relativen Ruhe oder Bewegung verursacht, oder zu verursachen strebt (Applied Mechanics, 4. Aufl. p. 15). Mit dem verkehrten Kraftbegriff hängt es auch zusammen, daß von Newton und vielen anderen versucht ist, den Parallelogrammsatz

der Kräfte zu „beweisen". Während Huygens (l. c.) und Euler (Mechanic, 1736, I) die Unbeweisbarkeit richtig erkannt und die geometrische Addition dafür eingesetzt haben.

Der Arbeitsbegriff wird gewöhnlich als eine dem 19. Jahrhundert angehörige Errungenschaft bezeichnet und vollends der Energiebegriff soll ganz modern sein. Das ist richtig, insofern die beiden Begriffe erst innerhalb der letzten 100 bis 150 Jahre zur Grundlage aller mechanischen und physikalischen Beobachtungen geworden sind, aber die Begriffe sind doch schon erheblich älter. Der erste, bei dem ich den Arbeitsbegriff gefunden habe, ist Kepler in den Harmonices mundi p. 122, 163f. Er hat die Naturkräfte, wie schon bemerkt, als animae bezeichnet, um das Substanzlose damit auszudrücken, er benutzt aber auch die Analogie mit der tierischen Anima, um sich über das Wesen der Leistung klar zu werden, wobei er wiederholt betont, daß er nicht denke, daß die Materie eine Anima wie die Tiere hätten, es ist ihm in der Tat nur Analogie. Nun unterscheidet er zwischen δύναμις und ἐνέργεια, und betont, daß er den zweiten Begriff im Gegensatz zu den anderen, die nur von Kräften reden, gebrauche, um damit die Leistung bzw. die Leistungsfähigkeit auszudrücken. Man solle die Leistung messen durch das, was in der Bewegung wirklich geleistet wäre, also z. B. durch die Größe des Weges, um welche ein Planet in einer gewissen Zeit fortschreite. Und die Leistung will er durch das in einer gewissen Zeit dargestellte Produkt aus dem Gewicht mit der Höhe (z. B. bei der Flut) darstellen. Natürlich ist das nicht ohne nebelhafte Beimischungen ausgesprochen, aber er erkennt doch schon, daß man jedem Körper eine facultas für eine Arbeitsleistung zuschreiben muß, und mehr als in dieser facultas in ihm liege, könne er nicht leisten; das ist in bezug auf die gegenseitige Anziehung gemeint. Er hat also eine unbestimmte Ahnung von dem Unterschied potentieller und kinetischer Energie. Etwas deutlicher tritt diese Unterscheidung bei Galilei auf (Discorsi 6 Tag, deutsche Ausgabe, p. 44): „Es ist klar, daß die Kraft des Stoßenden oder des Gestoßenen nicht ein einfacher Begriff sei, sondern von zwei Momenten abhänge, welche (zusammen) die zu messende Energie bestimmen, das eine ist das Gewicht, das andere die Geschwindigkeit", d. h. Galilei bezeichnet hier mit Energie das Produkt aus Kraft mal Weg in der Zeiteinheit, also den Effekt. Galilei sagt selbst, daß er „den Knoten nicht lösen könne, sondern nur etwas lockern". Er setzt dann aber am Hebel auseinander, daß das Produkt aus Gewicht mal Weg auf beiden Seiten gleich ist, daß also an Arbeit nichts

gewonnen wird. Man hat vermutet, daß Descartes seinen Begriff der Bewegungsgröße aus diesen Galileischen Auseinandersetzungen gewonnen habe, allein die Elzeviren-Ausgabe der Discorsi von 1638 enthält den 5. und 6. Tag nicht, es ist daher nnwahrscheinlich, daß hier ein Zusammenhang besteht. Der vou Galilei oft gebrauchte Ausdruck Moment für das Produkt aus Gewicht mal Wegelement (Della scienza mecanica) ist natürlich nicht zu verwechseln mit dem Produkt aus Kraft mal Hebelarm, wofür Galilei ebenfalls das Wort Moment gebraucht. L. Euler führt für den Arbeitsbegriff den Namen effort ein (Mém. de l'ac. Berl. 7, 1751/53, p. 174). Kraft mal Weg = effort und p. 178 „puisque la force vive $M \cdot u^2 \cdot$ est égalée a l'effort Φ pris negativement". In der 1772 vorgelegten Arbeit über Rammen setzt er die Arbeit gleich dem Gewicht multipliziert in den Weg (Opera postuma 2, p. 132, 1862). Auch in mehreren anderen Arbeiten kommt dieser Begriff vor.

Der Arbeitsbegriff ist dann unabhängig von der physikalischen Forschung nur in technischen Untersuchungen ausgebildet als Fußpfund und Pferdekraft zuerst von J. Watt gebraucht (Robisons System of mech. Phil.). Da J. Watt sehr wenig selbst veröffentlicht hat, sondern die Mehrzahl seiner Erfindungen und Entdeckungen brieflich seinen Freunden mitteilte, findet man in den Briefen eine ziemlich vollständige Geschichte der technischen Entwicklung in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts. Die Briefe sind veröffentlicht durch Muirhead, The origine and progress of the mechan. invention of James Watt etc., 3 Bde., London 1854. Die direkte Arbeitsmessung an der Maschine mit dem Pronyschen Bremszaum ist veröffentlicht von Prony: Sur un moyen de mesurer l'effet dynamique 1835 u. Ann. Chem. et Phys. 19, p. 165, 1822. In physikalischen Werken wird der Arbeitsbegriff erst wieder eingeführt in Verbindung mit der lebendigen Kraft oder auch der Wärme, wohl zuerst in Th. Young, Natural Phil., Bd. 1, 1807, p. 78; aber noch lange nachher sucht man vergebens in vielen Lehrbüchern nach einer Benutzung des Arbeitsbegriffes, z. B. in Biots Lehrbüchern. Dagegen hat Poncelet in Introduction à la mécanique industrielle etc., Paris 1829, in § 138 den Arbeitsbegriff in Verbindung mit der lebendigen Kraft grundlegend eingeführt. Die moderne Bezeichnung Energie, oder besser die Wiedereinführung dieses Namens für den Arbeitsbegriff, verdanken wir Rankine in seinem Aufsatz: On the reconcentration of the mechanical Energy, Phil. Trans. IV, 1852. In demselben Heft schließt sich auch W. Thomson dieser Bezeichnung an. Die systematische Unterscheidung von potentieller und kinetischer Energie gibt Rankine (ib. 17, 1859).

Die allgemeinen Prinzipien der Physik.

Das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeit.

Der Grundgedanke dieses Prinzips ist von Heron (Mechanik, p. 152 u. 154 u. 158) vollständig ausgesprochen: „Bei diesem Werkzeug (der Zahnradübertragung)“, heißt es da, „und den ihm ähnlichen Kraftentfaltungen, tritt eine Verzögerung ein, weil wir desto mehr Zeit gebrauchen, je geringer die bewegende Kraft im Verhältnis zu der zu bewegenden Last ist, so daß Kraft zu Kraft und Zeit zu Zeit im umgekehrten Verhältnis stehen.“ . . . „Daher ist das Verhältnis der bewegenden Kraft zur Zeit ein umgekehrtes.“ . . . „Was an Kraft gewonnen wird, geht an Zeit verloren, oder die kleine Kraft muß einen Weg durchlaufen, der sich zu dem der Last umgekehrt wie die Gewichte verhält“ (beim Hebel). Es ist darum kein Wunder, daß dies Prinzip sowohl den Arabern bekannt ist, wie auch den durch die arabische Literatur angeregten Italienern der Renaissance. So finden wir bei Leonardo da Vinci (Cod. Atl.): „Wenn eine Maschine zum Bewegen schwerer Körper gebraucht wird, so haben alle Teile der Maschine, welche die gleiche Bewegung haben, gleiche Belastung.“ Galilei hatte, wie schon bemerkt, den Begriff des Moments ausgebildet und spricht darum das Prinzip so aus: Zwei Kräfte sind im Gleichgewicht, wenn ihre Momente entgegengesetzt gleich sind (Della scienc. mec. III, Prop. 2). Ebenso beschäftigt sich Galilei in den Discorsi, 6. Tag, p. 44ff., mit diesem Prinzip; er setzt dabei stets parallele Kräfte voraus. Für beliebig gerichtete Kräfte spricht den Satz zuerst Joh. Bernoulli I in einem Briefe vom 26. 1. 1717 an Varignon (Varignon, Nouv. Mécan., Paris 1725, II, p. 174), aus: Wenn (an einem Körper) irgendwelche Kräfte auf irgendwelche Art angebracht sind und so, daß sie entweder mittelbar oder unmittelbar wirken, so ist Gleichgewicht vorhanden, wenn die Summe der positiven Energien gleich ist der Summe der negativen. Wo unter Energie das Produkt der Kraft in die Projektion der Verschiebung auf die Kraftrichtung zu verstehen ist. Letztere ist + oder — zu nehmen, je nachdem die Projektion auf die Verlängerung oder auf die Richtung der Kraft selbst fällt.“ Hierbei gebraucht J. Bernoulli auch zum ersten Male den Ausdruck „virtuelle Geschwindigkeit“, weil die Verschiebung nur gedacht ist, ohne daß sie wirklich eintreten müßte. Dadurch war das Prinzip als allgemein gültiges ausgesprochen, ohne wie bisher nur auf Hebel beschränkt zu sein. Es wurde dann nun auch von verschiedenen

Mathematikern analytisch benutzt, von Maupertuis (1698—1759) bei der Ableitung seines loi générale du repos (Mém. de l'Acad. Paris 1740). Wunderbarerweise versucht d'Alembert, das Prinzip für den Hebel zu „beweisen“ (Traité de dynamique, p. 182ff.); natürlich ist der Beweis ein Zirkelschluß. Dagegen hat L. Euler, der sich ja um die Grundlagen der analytischen Mechanik die größten Verdienste erworben hat, auch dies Prinzip benutzt in Réfléxions sur quelques lois générales de la nature etc. (Mém. de l'acad. Berlin 1750, p. 189). Eine hervorragende Bedeutung wies dem Prinzip Lagrange zu (Mécanique analytique II, Bd. 4, p. 8, spez. p. 69ff.), wo er aus demselben die analytischen Gleichungen ableitet, die für das Gleichgewicht notwendig erfüllt sein müssen. Trotzdem versucht auch Lagrange für das Prinzip einen Beweis aus den Gesetzen des Flaschenzuges abzuleiten, wie einst d'Alembert aus dem Hebelgesetz und dann auch Fourier. Wenn bisweilen behauptet ist, daß die große Verallgemeinerung dieses Prinzips bei Lagrange wesentlich dadurch erreicht sei, daß er die Variationen eingeführt habe, so muß betont werden, daß dies bereits Euler getan hat und Lagrange die Variationsrechnung im Gebiete der Mechanik lediglich übernommen hat, wenn auch anerkannt werden soll, daß er diese Anwendung besonders elegant und konsequent durchgeführt hat. Da das Prinzip nun ganz allgemein angewendet werden sollte, konnten für den Körper oder das System der Körper natürlich Bedingungen vorgeschrieben sein, die nicht ohne weiteres in das Prinzip eingingen. Darum ist von Bedeutung, daß Gauss (Opera V, p. 27) darauf aufmerksam macht, „daß dabei vorausgesetzt werden muß, daß die jeder Bewegung entgegengesetzte auch stets möglich sein muß, und wenn das nicht der Fall ist, kann man das Prinzip nur so ausdrücken, daß die Summe der virtuellen Momente niemals positiv werden kann“. Natürlich hat Gauss auch darauf aufmerksam gemacht, daß das Prinzip nicht „bewiesen“ werden kann, daß es aber für alle statischen Aufgaben entsprechende Auflösungen gibt. Wenn trotzdem auch nach Gauss noch hin und wieder versucht ist, das Prinzip zu beweisen, so hängt das wohl damit zusammen, daß das Prinzip ja auch angewandt werden soll für solche Aufgaben, wo die Bedingungen des Systems nicht ohne weiteres in analytische Formen der Kraftwirkungen gebracht werden können. Welche Schwierigkeiten für die mathematische Formulierung sich dabei ergeben und wie sie zu überwinden sind, hat C. Neumann (Sitzungsber. d. Ges. d. Wiss. Leipzig 1869, p. 257ff.) erörtert.

Das Prinzip von der Erhaltung des Schwerpunktes.

Eine Vorahnung des Prinzips hat schon Archimedes gehabt, indem er die Bewegungen der Körper bei parallelen Kräften auf die Bewegung des Schwerpunkts zurückführt. Aber auch die Nachfolger sind nicht über statische Fälle hinausgekommen, bis auf Huygens, der in seinem Horologium osc. 1673, IV, Satz 1, die Behauptung aufstellt: Wenn beliebig viele Körper infolge der Schwere sich bewegen, kann der Schwerpunkt nicht höher steigen, als er zu Anfang lag. Er beweist nun, daß ein System von drei Körpern ohne Kraftaufwand so verschoben werden kann, daß sie alle in der Horizontalebene des Schwerpunktes des Systems liegen. Dann zeigt er, daß der Schwerpunkt eines Pendels stets zu derselben Höhe ansteigt, von der er gefallen ist, ganz gleichgültig, ob er mit den anderen Punkten starr verbunden ist, oder nicht; er bewegt sich also so, als ob alle Punkte frei wären, d. h. wenn H die Höhe ist, zu welcher der Schwerpunkt ansteigt und h die Höhe für einen Punkt, so gilt die Beziehung $H = \frac{\Sigma m h}{\Sigma m}$.

Newton hat diesem Gedanken in seinen Principia, p. 17, folgende Fassung gegeben: Das gemeinsame Zentrum der Schwere ändert durch Kräfte der Körper unter sich seinen Zustand der Bewegung oder Ruhe nicht, und deswegen wird der Schwerpunkt aller gegenseitig aufeinander wirkenden Körper in Ruhe bleiben oder sich auf gerader Linie gleichförmig bewegen. Schon aus Huygens' spezieller Betrachtung, mehr noch aus der Newtons, geht hervor, daß es nicht auf die Schwere ankommt, sondern überhaupt nur auf parallel gerichtete Kräfte; daher sagt man heute lieber Massenmittelpunkt (Schell, Theorie der Bewegung und der Kräfte, Leipzig 1870, p. 791). D'Alembert hat dann gezeigt, daß das Prinzip nicht nur gilt für parallel gerichtete Kräfte konstanter Größe, sondern auch für Kräfte, die nach einem Punkte gerichtet sind und deren Größe eine für alle Punkte gleiche Funktion des Abstandes ist (Traité de dynamique II, Kap. 2). Endlich ist es von Lagrange (Méc. anal. II, sec. 3, § 1) auch auf Kräfte beliebiger verschiedener Richtungen ausgedehnt. Er leitet dann die Gleichungen

$$M.\frac{d^2\xi}{dt^2} = \Sigma X; \quad M\frac{d^2\eta}{dt^2} = \Sigma Y; \quad M\frac{d^2\zeta}{dt^2} = \Sigma Z$$

ab, wo ξ, η, ζ die Koordinaten des Schwerpunktes, M die Gesamtmasse der Körper, X, Y, Z die nach den Koordinatenachsen genommenen Komponenten der wirkenden Kräfte sind, und spricht

diesen Satz auch so aus, daß der Schwerpunkt eines Systems von Körpern sich so bewegt, als ob in ihm die Massen aller vereinigt seien und alle Kräfte auf ihn wirkten, wie er dann in alle Lehrbücher aufgenommen ist.

Das Prinzip der Erhaltung der Flächen.

Dasselbe ist hervorgegangen aus dem Keplerschen Gesetz über die Planetenrotation, wo in gleichen Zeiten gleiche Sektoren beschrieben werden. Newton spricht das Prinzip allgemeiner aus für alle Rotationen um ein festes Zentrum (Principia, p. 37): Areas quas corpora in gyros acta radiis ad immobile centrum virium ductis describunt, et in planis immobilibus consistere, et esse temporibus proportionales. L. Euler beschäftigt sich eingehend mit diesem Problem, zunächst in der Arbeit: De motu corporum in superficiebus mobilibus (Opusc. var. arg. I, 1746, p. 1), dann in vier Arbeiten, die erst in den Op. posth. II, 1862, p. 67, 74, 85, 114, erschienen sind. Das Prinzip bekommt da eine analytische Behandlung. Das System soll um einen festen Punkt rotieren, äußere Kräfte und Widerstände sind ausgeschlossen, die Momente in Richtung der festen Drehachse sind 0. Nehmen wir die Z-Achse des Koordinatensystems zur Drehachse, so ergibt sich für die xy-Ebene aus den allgemeinen Bewegungsgleichungen ohne weiteres $\Sigma m \left(x \frac{d^2 y}{dt^2} - y \frac{d^2 x}{dt^2}\right) = \Sigma (x Y - y X)$; da aber der Ausdruck $x \frac{d^2 y}{dt^2} - y \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt}\right)$ die Ableitung der doppelten Fläche des vom Radiusvektor in der Zeit dt beschriebenen Sektors nach der Zeit ist, so hat man das Drehungsmoment der wirkenden Kräfte in bezug auf die Z-Achse gleich $\frac{d}{dt} \Sigma m \varrho^2 \frac{d\vartheta}{dt}$, wenn ϱ der Radiusvektor und ϑ der Winkel zwischen ϱ und x ist. Ist das Drehungsmoment $= 0$, so gibt das Integral $\Sigma m \cdot \varrho^2 \frac{d\vartheta}{dt} = \text{const}$ und man kann das Prinzip mit Euler dann so aussprechen: Die Summe der Produkte aus der Masse jedes Körpers mal der Drehgeschwindigkeit und dem Abstand vom festen Zentrum ist unabhängig von der Wirkung der Körper aufeinander und bleibt konstant. Zu demselben Resultat kam Daniel Bernoulli (1700—1782) in einer gleichzeitig erschienenen Arbeit (Mém de l'Acad. I, Berlin 1746, p. 54). Kürzer drückt D'Arcy (Mém. de l'Acad. des scienc. Paris 1752) das Prinzip aus: Die Summe der Produkte der Massen in die Geschwindigkeiten und die Ab-

stände von dem Mittelpunkt auf die Richtungen der Körper ist konstant; er nennt das Prinzip dann conservation de l'action. Endlich drückt Lagrange das Prinzip so aus: Die Summe der Produkte der Massen in die auf eine Ebene projizierten Flächen ist der Zeit proportional; und er bekommt daraus dann natürlich die oben angegebenen Gleichungen. Seitdem ist das Prinzip in dieser oder ähnlicher Form in alle Lehrbücher der Mechanik eingegangen und ist für alle Rotationsbewegungen von Bedeutung geblieben.

Das Prinzip der Erhaltung der lebendigen Kraft.

Die Anfänge dieses Prinzips finden sich bei Galilei in den Discorsi, 3. Tag, bei der Behandlung des Falles über eine schiefe Ebene. Da zeigt er (deutsche Ausgabe p. 30) zunächst, daß die Geschwindigkeit am Fuße einer schiefen Ebene gleich der Geschwindigkeit beim freien Falle durch die Höhe der schiefen Ebene ist, und fügt (p. 31) hinzu, daß dieselbe proportional $\sqrt{h}$ ist. Im weiteren Verlauf der Untersuchung findet er dann (p. 37), daß die Geschwindigkeit am Fuße gerade so groß ist, daß der mit einer solchen Geschwindigkeit ausgestattete Körper auf die gleiche Höhe ansteigen würde. Leider hat er daraus aber keine weiteren Konsequenzen gezogen und für die nächste Zeit nach ihm beherrschte die physikalische Forschung allein das Descartessche Gesetz: Bewegungsgröße gleich Kraftantrieb. Daß das Produkt aus Kraft und Zeit nicht ein geeignetes Maß für die Arbeit ist, erkannte Huygens zuerst bei der Behandlung der Stoßaufgabe (s. oben) und sprach den Satz aus: La somme des produits de la grandeur de chaque corps dur multipliée par le quarré de sa vitesse est toujours la même devant et après la rencontre (Journal des scavants, 1669, Märzheft). Dann hat er in dem Horologium oscillat. (P. IV, Prop. IV, 1673) den Satz bewiesen, daß, wenn bei einem zusammengesetzten Pendel in einem Punkte der Schwingung die einzelnen Teile einzeln ohne Zusammenhang betrachtet werden und nun die Geschwindigkeiten derselben in die entgegengesetzten verwandelt werden, die einzelnen Teile wieder so hoch steigen, daß der gemeinsame Schwerpunkt wieder in die Anfangslage zurückgeführt wird. Diesen Gedanken hat er dann 1690 in einem Briefe (Oeuvres IX, p. 463) folgende Fassung gegeben: Da nach Galilei $h = \frac{v^2}{2g}$ ist, kann man bei dem zusammengesetzten Pendel, wenn man die Höhe des Schwingungs-

punktes H, die Gesamtmasse M und die Geschwindigkeit des Schwingungspunktes v' nennt, setzen $M \cdot H = \Sigma mh$; setzt man darin $H = \frac{v_1^2}{2g}$ und $h = \frac{v^2}{2g}$, so folgt $\Sigma mv^2 = Mv_1^2$.

Inzwischen war nun aber von G. W. Leibniz (1646—1716) die Arbeit Brevis demonstratio erroris-Cartesii in Acta erudit. 1686 erschienen, wo er gegen Descartes' Methode, die Arbeit zu messen und die Bewegungsgröße als das Konstante bei einem bewegten Körper zu betrachten, protestierte und unterschied zwischen einer lebendigen Kraft, welche in einem bewegten Körper vorhanden ist, und einer toten Kraft, die in einem ruhenden Körper vorhanden ist und durch einen Widerstand verhindert wird, Bewegung zu erzeugen. Dann sagt er, das Maß für die Leistungsfähigkeit (actio) eines bewegten Körpers ist nicht $m.v$, sondern $m.v^2$, und das ist die lebendige Kraft. Ausführlicher kommt Leibniz auf diesen Gegenstand zurück in Specimen dynamicum pro admirandis naturae legibus etc. (Acta erud. 1695), wo er den Nachweis erbringt, daß $m\,v^2$ die Wirkung ist, welche ein bewegter Körper leistet, wenn seine Geschwindigkeit aufgehoben wird. Im Verfolg dieser Leibnizschen Unterscheidung zwischen lebendiger und toter Kraft (kinetische und potentielle Energie) kommt Johann Bernoulli I (1667—1748) zu dem Satze, daß die Summe der lebendigen Kräfte mehrerer Körper, welche aufeinander, durch Druck wirken, stets dieselbe ist, und zwar gleich der lebendigen Kraft, welche durch die jene Körper bewegenden Kräfte hergestellt wird, darum nennt er dies Prinzip das von der Erhaltung der lebendigen Kraft. Er behandelt dann auch solche Fälle, wo scheinbar das Prinzip verletzt ist. Wenn z. B. zwei ganz weiche Körper aufeinander stoßen, scheint die lebendige Kraft vor dem Stoße $m\,v^2$ gänzlich verschwunden zu sein, da nach dem Stoße keinerlei Geschwindigkeit mehr vorhanden ist; aber da ist die lebendige Kraft zur Deformation gebraucht und kommt nicht wieder zur Tätigkeit, weil die Deformation bleibt und nicht wie bei elastischen Körpern wieder verschwindet. Das ist enthalten in: Discours sur les lois de la comm. du mouvement (Opera, Lausanne 1742, III, p. 23, 36, 38) und in der Arbeit: De vera notione virium vivarum (Opera III, p. 239).

Für die Huygenssche Pendelaufgabe war von besonderem Werte die Behandlung von Jakob Bernoulli (1654—1705) (Hist. de l'acad. Paris 1703 u. 1704, Opera II, p. 930), wo er ein beliebiges oszillierendes System behandelt und das Wiederaufsteigen des Schwerpunktes zu der Fallhöhe durch Zurückführung auf das Hebel-

gesetz beweist. Durch diese statische Kombination dynamischer Kräfte war dann das Gesetz von der Erhaltung der lebendigen Kraft eine notwendige Folge. Es war dadurch die Schwierigkeit von dem Resultat auf die Schwierigkeit des Übergangs von der Dynamik zur Statik verschoben.

Daniel Bernoulli (der Sohn Johanns) (1700—1782) hatte bereits in seiner ersten Petersburger Abhandlung (Comm. Acad. Petrop. I, p. 131) das Leibnizsche Prinzip als das für die Dynamik maßgebende ohne jede metaphysische Spekulation behandelt. Dann stellt er es in seiner Hydrodynamica 1738, I, § 18, an die Spitze, gibt die Entwicklung desselben und zeigt, daß für die mechanischen Probleme der Galileische und der von Huygens beim Pendel gefundene Satz sich ganz allgemein am einfachsten so ausdrücke (§ 19): Aequalitas inter descensum actualem ascensumque potentialem. Wie nutzbringend das Prinzip sei, zeigt D. Bernoulli in der Abhandlung in Hist. de l'acad. Berlin 1748. Hatte er in der Hydrodynamik dies Prinzip auf die Bewegungserscheinungen in Flüssigkeiten angewandt, so setzt er in dieser Arbeit Körper voraus, die sich anziehen mit einer Kraft, die eine Funktion der Entfernung ist. In der oben schon erwähnten Arbeit (Hist. de l'acad. Berlin I, 1746, p. 84) hatte D. Bernoulli schon das Resultat abgeleitet, daß bei einem um einen Punkt rotierenden System die Summe der lebendigen Kräfte, dividiert durch die Winkelgeschwindigkeit, konstant bleibt.

Für die weitere Entwicklung dieses Prinzips ist Lagrange (1736—1813) in seiner Mécanique analyt., Paris 1788 (2. Aufl. 1811 bis 1815) von Bedeutung. Er hatte von Euler die allgemeinen Bewegungsgleichungen übernommen und darin bedeutet $m \cdot \frac{d^2x}{dt^2}$ das Maß der Kraftkomponente der X-Achse; demgemäß ist die Arbeit $= m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \cdot dx$; wird dieser Ausdruck integriert, so folgt $\frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt}\right)^2$ oder $\frac{1}{2} mv^2$; das ist also nichts anderes als das Produkt der bewegenden Kraft in das Wegelement. Wenn nun die Leibnizsche Unterscheidung von lebendigen und toten Kräften in Lagranges Sinne umgewandelt ist in aktive und passive, d. h. solche, welche Ortsveränderungen bewirken (lebendige Kräfte) und solche, welche Spannungen darstellen (Widerstand), so erscheint die Anwendbarkeit des Prinzips auf alle mechanischen Probleme gesichert. Es wird darum das Prinzip auch von den späteren für dies Gebiet der Forschung allgemein anerkannt.

Die Erweiterung des Prinzips zu dem Prinzip der Erhaltung der Arbeit vollzieht sich auf Grund der Lagrangeschen Behandlung dann sehr einfach. Für alle mechanischen Vorgänge war das Prinzip theoretisch anerkannt, allein es zeigte sich, daß bei allen Experimenten, welche die lebendige Kraft umwandeln wollten in „tote“ Kraft, ein Verlust eintrat. Carnot (1753—1823) hat in seinen Principes fondamentaux, Paris 1803, und schon in Essai sur les machines en général, Paris 1783, für den Stoß unelastischer Körper diesen Verlust erklärt und gezeigt, daß, wenn man die Molekularwirkung mit in Rechnung setzt, das Prinzip vollständig erhalten bleibt. Diese Vorstellungsart übernimmt Lagrange in seiner Théorie des fonctions 1813. Der erste, bei welchem die Wärme in Beziehung zur lebendigen Kraft tritt, ist Th. Young, der den Eulerschen Gedanken, daß die Wärme nichts anderes als Molekularbewegung ist (Opuscul. var. arg. 1746, p. 169) wieder aufnahm und unter Benutzung der Rumfordschen Experimente (s. Abschn. Wärme) die Verluste der lebendigen Kraft (er wählt dafür das Wort Energie) in diesen Wärmewirkungen aufzufinden lehrte (Natur. Philos. London, Bd. I, p. 78, 1807). Wie wenig jedoch damals diese Auffassung Erfolg hatte, zeigt die Äußerung Fouriers (1768—1830) in der Vorrede zu seiner berühmten Theorie anal. de la chaleur, Paris 1822: „Was auch die Ausdehnung der mechanischen Theorien sein möge, sie wenden sich durchaus nicht auf die Wärmewirkungen an!“ Auch in Sadi Carnots (1796—1832) Réflexions sur la puissance motrice du feu, 1824, ist die Wärme noch als ein Stoff behandelt, der mechanischen Effekt hervorrufen kann dadurch, daß Wärme von einem Körper höherer Temperatur auf einen Körper niederer Temperatur überfließt. Zu diesem Transport diente in der Dampfmaschine, die er speziell daraufhin untersuchte, der Dampf als Träger, und er spricht den Satz aus, daß der Wärmestoff nie anders als vom Warmen zum Kalten übergehe, dabei aber mechanische Wirkung leisten könne.

Erst durch J. R. Mayer (1814—1878) bahnt sich das allgemeine Erhaltungsgesetz der Energie an. In der Arbeit: Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur (Ann. der Chem. u. Pharmac. 1842, Bd. 42, p. 233) spricht Mayer den Satz von der Äquivalenz von Wärme und Arbeit aus und bestimmt das Arbeitsäquivalent, indem er die Senkung einer ein Gas komprimierenden Quecksilbersäule gleich der durch die Kompression entbundenen Wärmemenge setzt. Sein Zahlenergebnis 365 ist freilich nicht gut. Mayer steht auch nicht auf dem Eulerschen Standpunkt, daß die Wärme nichts

anderes als Molekularbewegung sei, nur für strahlende Wärme nimmt er die Schwingung der kleinsten Teilchen an. Aber Mayer bezieht die Gleichung: halbe lebendige Kraft = Arbeit, auf alle Naturvorgänge, war er doch auf diese Forschungsbahn gekommen durch seine in Holländisch-Indien als Arzt gewonnene Erkenntnis, daß die Blutbeschaffenheit des Menschen von der Temperatur abhänge. Es ist also von Mayer mit vollem Bewußtsein das Gesetz der Erhaltung der Kraft auf alle Umwandlungen in der belebten und unbelebten Natur ausgedehnt; ausführlich tut er das in den Abhandlungen: Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel, 1845, und: Beiträge zur Dynamik des Himmels, 1848 (wieder abgedruckt in: Mayer, Mechanik der Wärme, 1867, p. 15 u. 149).

Es handelte sich nun um die experimentelle Feststellung des Arbeitsäquivalentes, da die Rumfordschen Versuche nicht ausreichten (s. Abschn. Wärme). Das Mayersche Gesetz wurde durch Helmholtz' Arbeit: Über die Erhaltung der Kraft, Berlin 1847, leider ohne R. Mayer zu nennen, allgemeiner verbreitet. Auf die höchst unerquicklichen Versuche, Mayers Priorität zu beseitigen, will ich nicht eingehen; sie sind durch die Innsbrucker Deutsche Naturforscherversammlung 1869 zum Schweigen gebracht. Der einzige, welcher unabhängig von Mayer, ausgehend von dem Satze, daß es kein perpetuum mobile geben könne, das Gesetz aussprach, daß es sich überall bei Naturvorgängen nur um eine Umwandlung der Kraftform (Arbeit) handele, war der Kopenhagener Ingenieur Colding in seiner Arbeit: Nogle Saetninger om Kraefterne (Dansk. Vid. Selsk. Skrifter, 1843); aber er hat diese Gedanken nicht weiter verfolgt. Für die Spannkräfte, welche durch die Umwandlung der lebendigen Kraft entstehen, hat Rankine, im Anschluß an die Youngsche Bezeichnung Energie, den Namen potentielle Energie eingeführt (Phil. Mag., Ser. 4, Bd. 4, 1852) — das Wort potentiell entnahm er D. Bernoulli, dessen Ausspruch oben wörtlich zitiert ist —, während für die lebendige Kraft W. Thomson den Namen kinetische Energie zuerst gebraucht hat (cf. Thomson u. Tait, Handbuch der theoret. Phys. I, 1871, p. 182). Seitdem hat sich die Bezeichnung Energie für Arbeit allgemein eingebürgert und der Satz von der Erhaltung der Kraft spricht sich damit nun so aus: Die Summe von potentieller und kinetischer Energie ist bei allen Umwandlungen konstant als das Prinzip von der Erhaltung der Energie. Doch hat sich in deutschen Büchern der Name lebendige Kraft noch lange erhalten; so spricht Kirchhoff noch 1883 den

Satz so aus: „Der Zuwachs, den die lebendige Kraft des Systems in irgendeinem Zeitintervall erleidet, ist gleich der Arbeit der wirkenden Kräfte für die Verschiebungen, die die Punkte in diesem Zeitintervall erfahren.“

Das Prinzip der kleinsten Wirkung.

In vielfache Beziehungen zu dem Gesetz der Erhaltung der Energie ist das Prinzip der kleinsten Wirkung getreten. Gewöhnlich wird als Vorentdecker dieses Prinzips Heron von Alexandrien genannt. Das ist ein Irrtum. Ebensowenig hat der Aristotelische Satz: „Die Natur tut nichts vergebens“, etwas mit dem Prinzip zu tun. Heron sagt (Katoptrik c. II, Ausgabe von Nix u. Schmidt, Opera II, 1, p. 320): Wegen der Wucht der entsendenden Kraft sucht der sich bewegende Gegenstand sich auf einer geraden Linie zu bewegen, da sie die kürzeste ist. Darum ist die größte Geschwindigkeit auf gerader Linie. Da die Lichtstrahlen eine unendliche Geschwindigkeit haben, bewegen sie sich in kürzester Linie (322). Mit diesem Erfahrungsprinzip leitet er in c. 4 u. 5 das Reflexionsgesetz für ebene und konvexe Spiegel ab. Fermat (1601—1665) ersetzt den kürzesten Weg durch die kürzeste Zeit und leitet damit das Brechungsgesetz ab (Oeuvres, Paris 1891, T. 1, p. 170). Auch er beschränkt dies Prinzip nur auf Lichtstrahlen, ist aber dazu veranlaßt durch Keplers Entdeckung, daß (mit heutiger Schreibweise) $\frac{f(x+h)-f(x)}{h}$ in der Nähe eines Minimums $= 0$ wird in der Stereometria doliorum, 1615 (Opera IV, p. 612.) Das allgemeine Prinzip ist von Maupertuis (1698—1759) zuerst als le principe de la moindre action ausgesprochen (Mém. de l'acad. Paris 1740, 1744, und Hist. de l'acad. Berlin 1747) in der Bedeutung, daß $m.v.s$, d. h. Bewegungsgröße mal Weg = Minimum sei. Versuche, die Priorität des Gedankens Maupertuis streitig zu machen, von Koenig, Malebranche, Wolf usw., sind widerlegt von Euler (Hist. de l'acad. Berlin 1752, p. 52, und Dissertatio de principio minimae actionis, Berlin 1753, p. 198). Schon in seinem Werke: Methodus inveniendi lin. curv. max. minimive proprietate, Lausanne u. Genf 1744, hat Euler in dem zweiten additamentum, p. 311, das Prinzip als ein ganz allgemeines behandelt und ihm die Form gegeben $m\int_a^b v\,ds = \text{Min.}$ oder $\partial\int v\,ds = 0$. Er beschäftigt sich wieder mit dem Prinzip in Hist. de l'acad. Berlin IV, 1750, p. 149. Euler hat das Prinzip auf verschiedene Probleme angewandt und

meint, es gelte so ganz allgemein. Er leitet damit ab, daß die Wurfbewegung eine Parabel ist. Eine Erweiterung und Einschränkung erfuhr das Prinzip durch Lagrange (Méc. analyt. II, sec. 3, § 6), wo er es auf ein System von Massenpunkten ausdehnt, und ib. I, p. 281, wo er als notwendige Bedingung hinzufügt, daß das Prinzip der Erhaltung der lebendigen Kraft für das System gelten müsse. Ersetzt man in dem Eulerschen Ausdruck ds durch $v.dt$, so ist also $\partial \int v^2 dt = 0$, und da $\frac{m.v^2}{2} = T$ die lebendige Kraft ist, muß $\partial \int 2T\,dt = 0$ sein. So leitet Lagrange aus dem Prinzip, welches er nun principe de la plus grande ou plus petite force vive nennt, die Bewegungsgleichungen ab. An die Lagrange-Form knüpft Hamilton (1805—1855) an. Er faßt die Variation der potentiellen Energie V und der kinetischen T zusammen und setzt

$$\partial \int_{t=0}^{t=t'} (V+T)\,dt = \partial \int_{t=0}^{t=t'} 2T\,dt\text{, d.h. } \partial \int_0^{t'} (T-V)\,dt = 0$$

und nennt dies Prinzip law of varying action (Phil. Trans. 1834, II, p. 247). In der letzten Lagrangeschen Form benützt es W. Thomson (Theor. Phys. I, p. 258), um für ein „konservatives“ System die ungezwungene Bewegung abzuleiten, sonst aber war es in der klassischen Mechanik meist durch das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeit (Verrückung) verdrängt. Allein Jacobi hat in seinen Vorlesungen über Dynamik (welche 1866 erschienen) p. 45 durch Einführung der Grenzbedingungen für die Gültigkeit und Anwendbarkeit des Prinzips eine weitere Bedeutung für dasselbe vorbereitet. Diese wurde von v. Helmholtz erkannt (Crelles Journ. 100, 1886) und es mit dem Gesetz der Erhaltung der Energie verbunden. Er sagt: Das Gesetz von der Konstanz der Energie sagt uns für den Fall der Bewegung nichts darüber aus, durch welche Reihe von Lagen nacheinander das System hindurchgehen werde, um von einer Anfangslage in eine gegebene Endlage zu kommen; darüber aber gibt das Prinzip der kleinsten Aktion Aufschluß, nämlich daß für die freie, ungestörte Bewegung des Systems die Aktion für kurze Abschnitte der Bewegung ein Minimum ist, oder mit anderen Worten: Die Trägheit führt bei gegebenem Werte der Energie die bewegten Massen immer auf solchen Wegen zum Ziele, wo sie für kurze Wegstrecken die kleinste Leistung zu vollbringen hat. Er wandte dasselbe auf die verschiedensten Gebiete an, zuletzt auch auf die Elektrodynamik, wo es ihm gelingt, ein solches kinetisches Potential zu bilden, daß die gleich 0 gesetzte Variation des Integrals desselben

zwischen zwei Zeitpunkten die Maxwell-Hertzschen Gleichungen und auch die ponderomotorischen Kräfte geben (Wied. Ann. 47, p. 1, 1892). Wegen der Unzulänglichkeit des Prinzips in seiner ersten Fassung hat C. F. Gauss dasselbe ersetzt durch das Prinzip des kleinsten Zwanges. Aus welchem man ohne Mühe das d'Alembertsche Prinzip ableiten kann (Crelles Journ. IV, p. 232, 1829).

Das D'Alembertsche Prinzip.

Durch die Einführung der reduzierten Pendellänge hatte Huygens 1673 die unfreie Bewegung des physischen Pendels auf die freie Bewegung des mathematischen zurückgeführt. Um diesen Satz innerlich zu begründen, hatte Jacob Bernoulli (1654—1705) die Bewegung des physischen Pendels so aufgefaßt, daß durch die Verbundenheit der Teile desselben einige Punkte einen Geschwindigkeitsverlust, andere einen Gewinn hätten und betrachtete diese Gewinne und Verluste unter dem Gesichtspunkt des Hebelgesetzes, dann müssen Verlust und Gewinn im ganzen sich ausgleichen (Acta erud. 1686, p. 356). Für diese Erklärung wies dann L'Hôpital (1661—1704) darauf hin, daß es nicht Geschwindigkeiten, sondern Beschleunigungen heißen müsse (Journ. de Rotterdam 1690). Diese Korrektur erkannte Bernoulli an und leitete nun (Mém. de l'Acad. Paris 1703) die Lage des Schwingungsmittelpunktes ab mit den gewonnenen und verlorenen Beschleunigungen. Er führt die Bewegung zurück auf 1. die freie, 2. die durch Druck- und Zugkräfte sich kompensierenden. Einen ganz ähnlichen Gedanken allgemeiner Fassung spricht Newton in seinen Prinzipien, p. 25, aus: Wenn die Wirkung eines Agens durch seine Kraft und Geschwindigkeit gleichzeitig gemessen wird und ebenso die Gegenwirkung aus den Geschwindigkeiten und Kräften der einzelnen Teile des Widerstand leistenden, die aus der Reibung, Kohäsion, Gewicht oder Beschleunigung entstehen, so muß bei allen Maschinen Wirkung und Gegenwirkung einander gleich sein. Diese Gedanken faßte d'Alembert für sein Prinzip zusammen. Er unterscheidet 1. die Bewegungen A, welche die Teilchen frei durch die angreifenden Kräfte ausführen würden, 2. die Bewegungen B, welche sie wirklich ausführen, 3. die durch die Bedingungsgleichungen zerstörten (verlorenen) Kräfte; dann heißt sein Prinzip: Während der Bewegung eines solchen unfreien Systems sind die verlorenen Kräfte immer im Gleichgewicht. Aber mit Rücksicht auf die virtuelle Arbeit kann man den Satz auch so aussprechen: Die virtuelle Arbeit der verlorenen Kräfte ist für jede

mit der Natur des Systems vereinbare Verschiebung = 0. Erste Angabe des Prinzips in Mém. de l'acad. Paris 1742, ausführlich in Traité de dynamique, Paris 1743, p. 49ff. D'Alembert gründet auf dies Prinzip seine Mechanik und gibt eine Fülle von Anwendungen. Ganz ähnlich hatte sich Fontaine des Bertins (1705—1771) schon 1739 in Mém. de l'acad. Paris ausgesprochen: Daß die Kräfte, welche die Körper haben, um gegen äußere Kräfte Widerstand zu leisten, sich gegenseitig aufheben müssen, d. h. sie müssen im Gleichgewicht sein.

Während d'Alembert also nur die verlorenen Kräfte ins Auge faßt, zieht Lagrange auch die beiden anderen Arten von Kräften heran in der richtigen Überlegung, daß man sehr oft nicht in der Lage ist, die verlorenen Kräfte zu bestimmen. Er gibt dem Prinzip daher den Wortlaut: Die mitgeteilten und die negativ genommenen resultierenden Kräfte halten einander im Gleichgewicht, so daß, wenn P, Q, R die angreifenden Kraftkomponenten sind, man die Gleichung erhält:

$$\sum_{k=1}^{k=n} m_k \left(\frac{d^2 x_k}{dt^2} \cdot \delta x_k + \frac{d^2 y_k}{dt^2} \delta y_k + \frac{d^2 z_k}{dt^2} \cdot \delta z_k \right) = P . \delta p + Q \delta q + R \delta r + \ldots)$$

(Méc. analyt., P. II, sect. II, § 5), wo die δ die virtuellen Verrückungen darstellen, wenn die Bedingungen des Systems berücksichtigt sind. Lagrange leitet so aus dem Prinzip die allgemeinen Bewegungsgleichungen ab und damit ist die allgemeine Gültigkeit des Prinzips für alle mechanischen Probleme gezeigt. Wenn freilich hin und wieder behauptet ist, daß erst durch das d'Alembertsche Prinzip möglich geworden sei, die Präzession und Nutation für die Erde einwandfrei abzuleiten, wie es d'Alembert in der Arbeit: Recher. s. l. précession des équinoxes et s. l. nutation d. l'axe d. l. t. (Mém. de l'acad. Paris 1749) getan hat, so ist das natürlich falsch. L. Euler hatte schon bald nach 1745 diese beiden Fragen beantwortet, diese Arbeit ist aber erst in den Opera posth. II, p. 317, erschienen, dagegen erschien in den Mém. de l'acad. Berlin V für 1749 von Euler eine Arbeit unter dem gleichen Titel wie die von d'Alembert (p. 289—325), worin die beiden Aufgaben ohne das d'Alembertsche Prinzip gelöst sind.

Dem Lagrangeschen Gedankengang schließen sich die neueren Darstellungen des Prinzips an. Man nennt die auf die Achsen bezogenen Komponenten der wirksamen Kräfte X, Y, Z, dann schreibt sich die Formel in der übersichtlichen Form:

$$\sum \left(m \frac{d^2 y}{dt^2} - X \right) \delta x + \left(m \frac{d^2 y}{dt^2} - Y \right) \delta y + \left(m \frac{d^2 z}{dt^2} - Z \right) \delta z = 0$$

(Kirchhoff, Mechanik, p. 25, 1883.)

Das Prinzip des kleinsten Zwanges.

In einer gewissen Beziehung zum d'Alembertschen Prinzip, insofern es auch eine Minimumforderung aufstellt, ist das Prinzip des kleinsten Zwanges von C. F. Gauss (Crelles Journ. IV, p. 232, 1829). „Die Summe der Produkte aus dem Quadrat der Ablenkung eines jeden Punktes von seiner freien Bewegung mal der Masse desselben ist für die wirkliche Bewegung ein Minimum." Die Bewegung eines Punktes mit der Masse m_k ist in einem System nur gezwungen durch die Bedingungsgleichungen des Systems; wenn der Punkt durch diese inneren Kräfte um die Strecke a in der Zeit dt fortgeführt würde, so nennt Gauss das Produkt $m_k \cdot a^2$ das Maß dieses Zwanges. Man kann dasselbe ohne weiteres aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung oder dem d'Alembertschen, oder aus dem Prinzip der virtuellen Verrückungen ableiten. Nach letzterem z. B. wäre $\Sigma m_k (a_k \delta x + b_k \delta y + c_k \delta z) = 0$. Dafür kann man schreiben $\delta \Sigma \frac{m}{2} (a^2 + b^2 + c^2) = 0$. Auf die enge Verbindung mit dem Satze von den Fehlerquadraten hat Gauss selbst hingewiesen. Die Anwendbarkeit des Prinzips zeigt besonders Scheffler in der Arbeit: Über das Gausssche Grundgesetz der Mechanik (Schlömilchs Ztschr. f. M. u. Ph. III, p. 197, 1858).

Hamiltonsches Prinzip.

Aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung, aber auch aus dem d'Alembertschen Prinzip, wie Kirchhoff in seinen Vorlesungen gezeigt hat, kann das Hamiltonsche Prinzip abgeleitet werden. Man kann die oben für das d'Alembertsche Prinzip gegebene Gleichung, da nach Euler die Variation einer Summe gleich der Summe der Variationen ist, zerlegen in:

$$\sum m\left(\frac{d^2x}{dt^2}\delta x + \frac{d^2y}{dt^2}\delta y + \frac{d^2z}{dt^2}\delta z\right) =$$

$$\frac{d}{dt}\sum m\left(\frac{dx}{dt}\delta x + \frac{dy}{dt}\delta y + \frac{dz}{dt}\delta z\right) - \delta\sum\frac{m}{2}\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right) .$$

Da ist der zweite Ausdruck rechts nichts anderes als die Variation der lebendigen Kraft $= \delta T$ und der Ausdruck links ist die bei der Verrückung geleistete Arbeit $= \delta U$. Wenn wir die δx, δy, δz so wählen, daß sie für die beiden Zeiten t_0 und t_1 verschwinden, so wird aus der Gleichung $0 = \int^{t_1} dt\,(\delta T + \delta U)$, wenn U eine Kräfte-

funktion ist, d. h. die Kraftkomponenten sind die partiellen Divinierten von U. Der Nutzen dieses Prinzips besteht im wesentlichen darin, daß dieser Ausdruck unabhängig von der Wahl des Koordinatensystems ist, man kann also bei n Punkten des Systems für die $3n$-Koordinaten des dreiachsigen Koordinatensystems neue Variabele $q_1 \ldots q_k$ einführen, so daß die $3n$-Koordinaten x_i, y_i, z_i Funktionen von $q_1 \ldots q_k$ sind, so ist U eine Funktion von $q_1 \ldots q_k$; dagegen wird T eine homogene Funktion zweiten Grades von $\frac{dq_i}{dt}$ und die Koeffizienten sind Funktionen von $q_1 \ldots . q_k$. Wenn man nun $\frac{\delta T}{\delta q_i'}\left(\text{wo } q_i' = \frac{dq_i}{dt} \text{ ist}\right) = p_i$ setzt, so daß T nun eine Funktion der q_i und p_i ist, so ergibt sich mit Hilfe eines von Poisson bewiesenen Satzes (Journ. de l'école polyt. XV, p. 266, 1809) und unter Berücksichtigung, daß U die q_i' nicht enthält, also $\frac{dq_i}{dt} = \frac{\delta(T-U)}{\delta p_i}$ wird, daß $\frac{dq_i}{dt} = \frac{\delta H}{\delta p_i}$ und $\frac{dp_i}{dt} = -\frac{\delta H}{\delta q_i}$ ist, wenn $T - U = H$ gesetzt wird. Dies H nennt Hamilton die charakteristische Funktion (Phil. Trans. London 1834, II, p. 247, und 1835, I, p. 95). In dieser letzten Form wird das Hamiltonsche Prinzip besonders häufig, vor allem bei den Störungsproblemen, angewandt. Die große Fruchtbarkeit desselben und die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten und -formen verdankt dasselbe wesentlich der Jacobischen Darstellung (Vorlesungen über Dynamik von 1842/43, herausgeg. von Clebsch 1866), worin auch Beispiele vollständiger Integration der Gleichungssysteme gegeben werden (p. 175ff.) und die Bedeutung für die Analysis auseinandergesetzt wird (p. 303). Das Prinzip wird darum nicht mit Unrecht auch das Jacobi-Hamiltonsche genannt. Tatsächlich ist das Hamiltonsche Prinzip auf dem Wege über Euler und Lagrange (Méc. analyt. II, s. 3, p. 6) aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung hervorgegangen. Hamilton nennt es law of varying action. Eine ausführliche Geschichte des Prinzips von der kleinsten Wirkung gab Adolph Mayer in seiner Leipziger Antrittsrede. Die vielseitige Bedeutung dieses Prinzips ist von v. Helmholtz gewürdigt in Crelles Journ. 1886 und in seiner Arbeit: Zur Geschichte des Prinzips der kleinsten Aktion vom 10. 3. 1887 in den Berichten der Akademie. Diese Behandlung des Prinzips durch v. Helmholtz steht in engem Zusammenhang mit seinen bekannten Arbeiten über monozyklische Systeme in Crelles Journ. 1884 und den vier Berichten der Akademie von 1884.

Potentialtheorie.

Der Potentialbegriff ist nicht bei Lagrange, wie in allen Lehrbüchern behauptet wird, zuerst gegeben, sondern von Euler, und ist dort auf folgende Weise entstanden. Schon in der Mechanik II, § 195 (1736) nimmt Euler an, daß P, Q, R die in den Richtungen der x, y, z-Achse liegenden Komponenten einer wirkenden Kraft seien, dann ist die Arbeit dargestellt durch $P\,dx + Q\,dy + R\,dz$. Hier verfolgt er den Gedanken nicht weiter; er kehrt wieder in der Theoria motus, c. V, p. 77 (1765), wo er zunächst eine Bewegung in einer Ebene betrachtet. Da ist $P = m\frac{d^2x}{dt^2}$; $Q = m\frac{d^2y}{dt^2}$ und $\frac{m.v^2}{2} = \int(P\,dx + Q\,dy)$, für $\frac{m}{2}$ setzt Euler stets $\frac{A}{2g}$ ($A =$ Gewicht). Das wendet er zunächst auf Rotationsbewegung und Pendelbewegung an, dann (p. 85) macht er die gleiche Überlegung für den Raum, wo er $P = V\cos\alpha$, $Q = V\cos\beta$, $R = V\cos\gamma$ als die Komponenten der wirkenden Kraft V betrachtet und dann die Bewegungsgesetze ableitet, die wir bei Lagrange (Mém. de l'acad. Berlin für 1773, p. 121, 1775) wiederfinden und die irrtümlich allgemein als die Lagrangeschen Gleichungen bezeichnet werden. Sehr viel weiter kommt Euler in den beiden Abhandlungen Principia motus fluidorum I (Nov. comm. acad. Petropolitanae VI, p. 271, 1761). Ein Flüssigkeitsteilchen habe in einer Ebene die beiden Geschwindigkeitskomponenten u und v. Dann muß für alle möglichen Bewegungen die Gleichung $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$ erfüllt sein, und im Raume wird die Bedingungsgleichung heißen: $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$. Dann ist $u\,dx + v\,dy + w\,dz$ ein vollständiges Differential, es sei S, dann ist $u = \frac{\partial S}{\partial x}$; $v = \frac{\partial S}{\partial y}$; $w = \frac{\partial S}{\partial z}$; und daraus ergibt sich $\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = 0$ (p. 300). Im Teil II (ib. XIV, 1, p. 271, 1770) bestimmt Euler zunächst aus u, v, w den Druck und die Dichtigkeit. Sind beide konstant, so ist wieder $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$, und $u\,dx + v\,dy + w\,dz$ ist integrierbar. Sei das Integral J, dann ist $u = \frac{\partial J}{\partial x}$; $v = \frac{\partial J}{\partial y}$; $w = \frac{\partial J}{\partial z}$; und es ist wieder $\frac{\partial^2 J}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 J}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 J}{\partial z^2} = 0$. Das heißt nichts anderes, als wir haben hier das schon von Helmholtz so genannte Geschwindigkeitspotential vor uns, und zwar in Form der sogenannten Laplaceschen Gleichungen. Euler

sucht nun Funktionen, die dieser Gleichung genügen, und gibt als solche an $J = \Gamma : (\alpha x + \beta y + \gamma z)$, oder:

$$J = e^{\alpha x + \beta y} (A \sin Z \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} + B \cos Z \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}) .$$

In demselben Kapitel behandelt er nun auch den Fall, daß auf das Flüssigkeitsteilchen eine Kraft wirkt, deren Komponenten P, Q, R sind. Soll die Aufgabe lösbar sein, so muß $P\,dx + Q\,dy + R\,dz$ integrierbar sein, also $(P\,dx + Q\,dy + R\,dz) = d\,S$ sein, und die weiteren Folgerungen sind dann die gleichen, wie oben. Euler kommt also auch für die Kraft zu der Gleichung: $\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = 0$. Die abgekürzte Schreibweise Δ für diese Operation stammt von Murphy in seinen Elementary principles etc. I, p. 140, 1833. Leider setzt Euler diese Betrachtung nicht fort, sondern behandelt nun den Fall, daß Druck und Dichte Funktionen des Ortes sind. Die weitere Entwicklung der Potentialtheorie zu verfolgen, ist hier nicht nötig. Ich verweise für diese Zeit nach Euler auf die sehr ausführliche und in Angabe der Quellen durchaus zuverlässige „Geschichte der Potentialtheorie“ von Bacharach, Göttingen 1883, wo allerdings Euler ganz übergangen ist und darum irrtümlich Lagrange als origineller Schöpfer des Potentialbegriffes erscheint.

Die Mechanik der Flüssigkeiten.

Ein großer Teil der Hydrostatik ist schon von Archimedes und Heron (s. oben) behandelt und hat in der Renaissance die Anregung gegeben, sich mit diesem Gebiete der Forschung zu beschäftigen. Durch die unbeschränkte Benutzung der reichen Manuskriptsammlung der Pariser Bibliothek war es P. Duhem möglich, den Faden der Entwicklung von Archimedes über Jordanus Nemorarius (etwa 1230), Nicolaus de Cusa (1401—1464), Leonardo da Vinci (1452—1519), Cardano (1501—1576) bis zu Stevin zu verfolgen (in Duhems Léonard de Vinci II, Statique I, p. 98ff., und Système du monde II—V). Es fehlt dabei der Hinweis, daß ein sehr großer Teil der Versuche Leonardos nur Wiederholungen der Experimente Herons sind. Besonders interessant ist der von Duhem gelieferte Nachweis, daß Cardano die Manuskripte Leonardos benutzt hat und ohne seine Quelle zu nennen (Statique I, p. 34ff.) in seinen beiden Werken De subtilitate 1551 und im Opus novum 1570 weitgehend speziell die Statik daraus abgeschrieben hat. Doch ist auch nicht zu bezweifeln, daß Stevin Herons Werke selbst gekannt hat.

Besonders hat Stevin Anregung daher empfangen, daß er die hydrostatischen Grundgesetze, des Auftriebs, des Boden- und Seitendrucks, des spezifischen Gewichtes, der kommunizierenden Röhren, der schwimmenden Körper, des stabilen und labilen Gleichgewichts, welche das Altertum ihm übermittelt hatte, bestätigte und z. T. durch neue Versuchsbedingungen zugänglicher machte. So rührt von ihm der noch heute gern gezeigte Versuch mit der losen Bodenplatte her, die durch einen Hebel gegen das zylindrische oder kegelförmige Gefäß gedrückt wird, und mit der durch den Wasserdruck gegen einen mit Luft gefüllten Zylinder gepreßten Bodenplatte (De Beghinselen der Weegkonst, Leyden 1586, und Les œuvres math., II, p. 484, Leyden 1634). Er erwähnt dabei auch, daß man auf Grund des Bodendruckgesetzes eine Wasserpresse mit sehr hohem Druck und wenig Wasser herstellen könne, wenn man ein enges, hohes Rohr in einen weiten Zylinder endigen lasse. Die Verbindung dieses Gedankens mit der aus dem Altertum (Heron und Ktesibius) bekannten Feuerspritze ist in dem englischen Patent für Bramah 1795 auf die hydraulische Presse angewandt und technisch verwertet.

Auch Galilei hat sich mit diesen Fragen beschäftigt (Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua etc.) und konstruiert, um die spezifischen Gewichte möglichst bequem bestimmen zu können, die hydrostatische Schnellwage (Bilancetta). Auch das Archimedische Aräometer taucht wieder auf. Der Lioner Arzt Monconnys (1611—1665) stellte ein solches aus Glas her mit einer unteren Belastung von Quecksilber oder Schrot; das Gefäß hatte einen kegelförmigen Hals, auf welchen ringförmige Gewichte aufgesteckt wurden, bis das Aräometer vollständig in die Flüssigkeit tauchte (veröffentlicht von A. Kircher im Mundus subterraneus I, lib. V, c. V). R. Boyle (1627—1691) dagegen ließ das Gewicht des Schwimmers konstant bleiben und versah ihn mit einem graduierten Stiel (Phil. Trans. 24, p. 447). Er führte auch die Aräometer für bestimmte Flüssigkeiten ein, Bier-, Weinwage usw., die dann später (1811) durch das Alkoholometer von Tralles (1763 bis 1822) ergänzt wurden.

Daß die Menge des aus einer Öffnung eines Gefäßes ausfließenden Wassers nicht konstant ist, hat, nachdem Heron es ausführlich bewiesen hatte, auch Julius Frontinus 110 n. Chr. in seinem De aquaeductibus gesagt; aber er sagt, sie hänge ab von der Größe der Öffnung und der Höhe des Wasserspiegels über dieser Öffnung. Die gleiche Ansicht spricht 1640 Benedict Castelli (1577—1644)

aus (Della misura dell' acqua correnti, veröffentlicht in Nuova raccolta etc. Parma 1766, I u. VII). Richtig gibt Ev. Toricelli (1608—1647) an, die Geschwindigkeit des ausfließenden Wassers verhalte sich wie die Quadratwurzel seiner Höhe, d. h. seine Geschwindigkeit sei so groß, als ob es von der Höhe der Wassersäule frei herabgefallen sei. Dementsprechend ist die Bahn des ausfließenden Wassers eine Parabel, wenn man das Loch in der Seitenwand macht. Die abfließenden Wassermengen verhalten sich wie die Produkte aus Geschwindigkeit mal Größe der Öffnung. Auch aus Löchern im Boden läßt Toricelli das Wasser ausfließen und findet, daß die ausfließenden Wassermassen in gleichen Zeitabschnitten sich wie die ungeraden Zahlen 1 : 3 : 5 usw. verhalten, wenn man von dem letzten Zeitabschnitt mit 1 anfängt zu zählen (Del moto di gravi, Firenze 1644). Mersenne (1588—1648) zeigt, daß der seitlich ausfließende Strahl keine vollständige Parabel sei wegen des Luftwiderstandes. Dieselbe Ursache bewirke auch, daß der aufsteigende Wasserstrahl nicht die Höhe des Wasserstandes in dem Behälter erreicht (Phaenomena hydraulica pneumatica, Paris 1644). Im übrigen bestätigt Mersenne die Toricellischen Beobachtungen und sein Theorem.

Obwohl mehrere Beobachter alsbald diese Versuche wiederholten, haben weder sie noch die beiden ersten Beobachter die Zusammenziehung des Ausflußstrahles beobachtet. Auch I. Newton ist in der ersten Auflage seiner Principien (p. 330, Prob. 37) daran vorbeigegangen; auch seine Ableitung über die Ausflußgeschwindigkeit ist nicht richtig. Erst in der zweiten Auflage von 1713 (Cotes), Buch II, prob. 36, bemerkt er die contractio venae und mißt dieselbe nahezu richtig, aber seine Erklärung durch die konvergierende Richtung der ausfließenden Wasserteilchen ist nicht richtig. Ausführlicher und im wesentlichen richtig beobachtet J. Poleni unabhängig von Newton die Erscheinung (De castellis, Florenz 1718). Er stellt den Einfluß der Ausflußöffnung fest, ob dieselbe ein rundes Loch in einer dünnen Platte ist, oder ob ein Ansatzrohr den ausfließenden Strahl leitet; im zweiten Falle ist ein Unterschied der Ausflußmenge, wenn das Rohr konisch oder zylindrisch ist; bei letzterem fällt die Kontraktion nahezu fort. Der erste, welcher die contractio venae analytisch zu behandeln sucht, war Daniel Bernoulli in seiner Hydrodynamik (Straßburg 1738). Er versucht, mit dem Satze von der Erhaltung der lebendigen Kraft eine Lösung zu finden, die jedoch nicht erschöpfend ist; seine Versuche, die Bahn der Wasserteilchen nachzuweisen durch suspendierte, kleine

Teilchen von Siegellack sind sehr lehrreich. Diese Methode war von Huygens in seiner Dissert. de causa gravit. (1681) erfunden.

Mariotte beschäftigt sich mit dem Einfluß der Ausflußröhren bei Springbrunnen (Traité du mouvement des eaux, P. IV, Oeuv. p. 441, 1686). In gleicher Richtung liegen die Untersuchungen von s'Gravesande (Elementa phys., § 802), deren wichtigstes Resultat ist, daß aus zylindrischen Röhren, die durch eine dünne, durchlöcherte Platte geschlossen sind, die Steighöhe am größten ist. Ist die Ausflußöffnung nicht rund, sondern rechteckig oder in Kreuzform, so treten außer der Kontraktion auch über den ganzen Strahl ausgebreitete periodische Formänderungen ein, welche wohl zuerst von Hachette (1769—1834) untersucht sind (Ann. de chim. et de phys., Ser. II, 3 u. 4, 1816 und 1817). Er macht auch zuerst einen Versuch, eine Erklärung zu geben, der aber nicht gelingt. Eine Grundlage für eine theoretische Behandlung dieses Problems gibt Helmholtz 1868 (Monatsberichte der Berliner Akademie, April), jedoch ist die Anwendung auf die Kontraktion des Ausflußstrahles nicht gegeben. Unter bestimmten Voraussetzungen ist das Problem von Kirchhoff in seiner Mechanik, p. 290ff., 1883, behandelt.

Kompressibilität.

Über die Zusammendrückbarkeit des Wassers sind aus dem Altertum keine Versuche oder Erfahrungen, sondern nur Behauptungen (s. oben), vorhanden. Der erste, welcher hierüber einen Versuch anstellte, war wohl Bacon von Verulam (1561—1626). Eine mit Wasser vollständig gefüllte und dann zugelötete Bleikugel preßte er flach, bis zu einer bestimmten Grenze gelang das; ging er aber über diese Grenze hinaus, dann drang das Wasser wie „feiner Tau" durch die Bleiwand. Er schloß aus dem Experiment, das Wasser habe eine, wenn auch geringe, Elastizität (Novum organon, 1620, Opera, Francf. 1665, p. 390). Das gleiche Experiment stellte die Accademia del Cimento mit einer Silberkugel an, ohne Erfolg (Saggi, in der lateinischen Ausgabe von Musschenbroek, 1731, II, p. 58), ebenso Robert Boyle (1627—1691) um 1660, ohne die früheren Versuche zu erwähnen (New Experiments, Physico-Mechanical etc., Oxford 1660; in der lateinischen Ausgabe ist es das 20. Experiment). Diese und analoge Versuche anderer, z. B. Fabri und Du Hamel, aus dieser Zeit sind nicht beweiskräftig, weil das Wasser nicht von Luft gereinigt war. Der Erfolg war, daß einige die Kompressibilität behaupteten, andere sie leugneten, z. B. Newton (Opuscula XX,

p. 416). Auch die zahlreichen Versuche aus der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts waren widersprechend, weil fehlerhaft. Erst Canton (1718—1772) kam zu einer Versuchsanordnung, welche die Veränderung des Gefäßvolumens durch den äußeren Druck vermied, da derselbe Druck auch von innen wirkte; dabei stellte er für Wasser, Weingeist, Olivenöl, Quecksilber eine geringe Zusammendrückbarkeit fest (Phil. Trans. 1762, II, p. 641, u. 1764, p. 261). Bei den Versuchen von Abich und Zimmermann (Über die Elastizität des Wassers, Leipzig 1729), die ebenfalls eine geringe Kompressibilität ergaben, ist eine Kompressionspumpe angewandt. Canton führte den Ausdruck Kompressionskoeffizient ein; ist die Volumenveränderung v, der Druck p, so ist $v = k \cdot p$, wo k der Kompressionskoeffizient ist; dessen reziproker Wert ist der Elastizitätskoeffizient. Genauere Messungen stellte Oersted (1777—1851) mit dem von ihm konstruierten Piezometer 1822 an (Dansk. Vidensk. Selk. Skrifter; Pogg. Ann. IX, p. 603); er findet $k = 46 \cdot 10^{-6}$ bei dem Druck einer Atmosphäre. Die Vernachlässigung der Volumänderung des äußeren Gefäßes, in welches das Piezometer eingeschlossen war, wollten Colladon und Sturm beseitigen, aber ihre Resultate sind auch nicht frei von Fehlern (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. II, 36, p. 113, 1828). Aus den Regnaultschen Versuchen (Mém. de l'acad. Paris 1847, p. 429) folgt für k der Wert $47{,}7 \cdot 10^{-6}$. Für eine große Reihe von Flüssigkeiten untersuchte Grassi unter Berücksichtigung der Temperatur die Kompression (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, 31, 1851). Danach würde bei steigender Temperatur für Wasser der Kompressionskoeffizient abnehmen, bei anderen Flüssigkeiten zunehmen. Quincke benutzte auch die Änderung des Brechungsexponenten von Flüssigkeiten bei hydrostatischem Druck (Wied. Ann. 19, p. 401, 1883). Den Einfluß der Temperatur stellten Röntgen und Schneider (ib. 33, p. 644, 1888) fest für Wasser; sie finden bei 0^0 $k = 51{,}2 \cdot 10^{-6}$; bei $9^0 = 48{,}1 \cdot 10^{-6}$; bei $17{,}95^0 = 46{,}2 \cdot 10^{-6}$. Dann untersuchte Röntgen eine Reihe anderer Flüssigkeiten, Schwefelkohlenstoff und verschiedene Alkohole, mit Bestätigung der Grassischen Resultate, daß bei diesen mit steigender Temperatur der Kompressionskoeffizient zunimmt (ib. 44, p. 1, 1891). Die Werte, welche er erhält, sind in guter Übereinstimmung mit denen Amagats (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. V, 11, p. 535, 1877) und von Pagliano und Palazzo (cf. Beiblätter 9, p. 150, 1885). Auch die Beziehung des Brechungsexponenten zum Druck hat Röntgen mit Zehnder eingehend untersucht und die Quincke-

schen Angaben richtiggestellt (ib. p. 26); endlich ist von ihm auch der Nachweis erbracht, daß die Kompressionswärme bei seinen Resultaten berücksichtigt ist (ib. 45, p. 560, 1892). Damit ist dies Problem wohl definitiv gelöst.

Kapillarität.

Die älteste uns überlieferte Benutzung der Kapillarität stammt von Platon (s. o.). Auch die Araber, welche hin und wieder genannt werden als Entdecker, sind über das Platonsche Experiment mit dem Wollfaden nicht hinausgekommen. Es waren also wirklich Haare, an denen die Erscheinung zuerst beobachtet wurde, so daß sie mit Recht Kapillarität heißt. Erst Leonardo da Vincis Experimente in dieser Richtung gehen über die Platonschen Kenntnisse hinaus. Libri behauptet zwar in seinem Hist. des sciences math. en Itali III, p. 54, er habe die Kapillarität entdeckt. Das ist nicht richtig, aber er hat das Aufsteigen des Wassers in dünnen Röhren beobachtet. Die Versuche mit Haarröhren sind dann in der Accademia del Cimento und gleichzeitig von Isaac Voss (1618—1689) fortgesetzt. Ob auch Voss von L. da Vinci Kenntnis gehabt hat, ist nicht auszumachen; daß die Mitglieder der Accademia del Cimento seine Versuche kannten, ist sehr wahrscheinlich, da nicht nur Cardano die Manuskripte eingesehen hat, sondern noch mehrere Personen, wie Duhem (l. c.) nachgewiesen hat. Voss findet, daß das Wasser in einer nassen Röhre höher als in der trockenen steigt; die gleiche Erscheinung bietet das Aufsaugen des Wassers durch einen Schwamm, das Aufsteigen des Pflanzensaftes. Er beobachtet die Depression des Quecksilbers in Kapillarröhren, aber er erklärt die Sache durch die Klebrigkeit des Wassers und den Mangel an Klebrigkeit des Quecksilbers (De Nili et aliorum fluminum origine, 1666). Bald darauf erschien von Honore Fabri (1606—1688) seine Physica (1669), in welcher er die Erhebung des Wassers in solchen Röhren durch den Druck der Luft erklären will. Glücklicher war G. A. Borelli (1608—1679) in seinen Versuchen, die er zum größten Teile in der Accademia del Cimento anstellte, aber erst 1670 in De motionibus nat. a gravitate pendent. veröffentlichte. Er findet die Höhe, bis zu welcher sich das Wasser erhebt, gleich der Höhe der Wassersäule, welche beim Herausziehen der Röhre aus dem Wassergefäß in derselben hängen bleibt; weiterhin sagt er, die Steighöhen in zwei Röhren verhalten sich umgekehrt wie die Röhrendurchmesser. Dann aber wiederholt er die Versuche

Normans (1576), daß eine kleine, auf Wasser gelegte magnetisierte Stahlnadel auf dem Wasser schwimmt und sich in die Nordsüdlinie einstellt, erweitert diese durch Beobachtung zweier dünnen Metallplatten, die sich einander bis zur Berührung nähern, oder zweier Holzplatten, an denen er die Erhebung des Wassers beobachtete; und diese Erhebung scheint ihm die Ursache des Zusammenschwimmens der Platten zu sein. Jedoch gelingt ihm keine ausreichende Erklärung.

I. Newton dehnt die kapillare Erhebung des Wassers auch auf Versuche mit zwei parallelen, sehr nahe beieinander stehenden Glas- und Marmortafeln aus, und schließt daraus, daß zwischen den Wasserteilen und den Glasteilen eine größere Anziehung besteht als zwischen Wasserteilen untereinander (Princ., lib. II). Carré fügte die Beobachtung zu, daß die Flüssigkeit im luftleeren Raume in den Haarröhren sich höher erhebe als unter Luftdruck (Mém. de l'acad. Paris 1724). Hawksbee stellte zwei Glasplatten unter einem Winkel von 20′ gegeneinander in das Wasser und fand die Hyperbel als Grenze der Wassererhebung (Append. phys. mech. exper. etc., 19 u. 20, 1708). Eine Erklärung der Erscheinungen in den Haarröhren gibt zuerst Josias Weitbrecht (1702—1747, Comm. Petropol., T. VIII, p. 261), indem er annimmt, daß zwischen den Teilchen des Glases und den Wasserteilchen in der Berührung eine Anziehung bestehe, welche mit der Entfernung sehr viel schneller als die allgemeine Gravitation abnehme, so daß nur eine ganz dünne Wasserschicht von dieser Anziehung direkt gehalten werde; diese aber wirke durch die Kohäsion des Wassers auf die inneren Schichten der erhobenen Wassersäule. Ob also eine Flüssigkeit erhoben oder deprimiert werde, hänge von dem Verhältnis der Kohäsion zu jener Anziehung zwischen den Teilen der Röhre und denen der Flüssigkeit ab. Daß auch zwischen Quecksilber und Glas solche Anziehung stattfindet, hat Gay-Lussac ausführlich mit der Wage nachgewiesen (Gilb. Ann. 33, p. 320, 1809, nach dem 2. Suppl. zum 10. Buche der Méch. celeste, 1805, von Laplace).

Von den Weitbrechtschen Anschauungen geht Laplace (1749—1827) aus, aber er war es, der diese Frage nun mit dem Normaldruck in der Oberfläche der Flüssigkeiten verband in seiner Théorie capillaire (l. c.). Leonhard Euler hatte für gekrümmte Oberflächen von Flüssigkeiten bereits nachgewiesen, daß, wenn man durch einen Punkt der Oberfläche beliebig viele senkrechte Schnitte legt und die Krümmungsradien für die stärkste Krümmung R, für die schwächste R' nennt, die Summe der reziproken Werte der

Krümmungsradien zweier zueinander senkrech er Schnitte gleich der Summe $1/R + 1/R'$ ist (Nov. comm. Petersb., 13, p. 305, 1769, und deutsche Übersetzung von Brandes, Die Gesetze des Gleichgewichts und der Bewegung flüchtiger Körper, Leipzig 1806). Bezeichnet man dann mit H den auf die Flächeneinheit einer Kugel vom Radius 1 durch die Oberflächenspannung ausgeübten Druck und mit K den auf die Flächeneinheit einer ebenen Oberfläche derselben Flüssigkeit ausgeübten Druck, so hat Th. Young den Satz bewiesen, daß der Normaldruck in einer gekrümmten Oberfläche

$$P = K \pm \frac{H}{2}\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)$$

ist (Phil. Trans. 1805, p. 65). Dieser Satz ist dann von Laplace (l. c.) und Poisson (Nouvelle théorie de l'action capill., Paris 1831), von C. F. Gauss (Comm. soc. Götting. VII, 1832, p. 43) erneut abgeleitet und benutzt. Nun zeigt Laplace, wie unter Annahme einer Wechselwirkung zwischen den Teilen der Wand und denen der Flüssigkeit sowohl die Erhebung wie die Depression zustande kommt und beweist, daß die Höhe beider Flüssigkeitssäulen nur von der Krümmung der Röhren abhängt, sowohl theoretisch wie durch Experimente. Bezeichnet man den Quotienten aus H durch die Dichte der Flüssigkeit s mit a, also $H/s = a$, so nennt Poisson (l. c.) a^2 die Kapillaritätskonstante, die bei vertikaler ebener Wand gleich dem Quadrat der Steighöhe ist. Die Anwendung der Theorie auf die Bestimmung der Form eines Tropfens gab Mousson (Pogg. Ann. 142, p. 412, 1871) und Quincke (Pogg. Ann. 105, p. 8, 1858) mit historischen Angaben (s. ib. 134, p. 441; 135, p. 642; 138, p. 142).

Daß die Grundgleichungen der Kapillarität aus dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeit abgeleitet werden können hat Boltzmann (1844—1906) nachgewiesen (Pogg. Ann. 141, p. 582, 1870). Aber die Versuche von Wilhelmy (Pogg. Ann. 119, p. 177, 121, p. 47, u. 122, p. 1, 1863/64) scheinen gezeigt zu haben, daß die Voraussetzung der Laplaceschen Gleichung, daß nämlich die Molekularkräfte nur in unendlich kleiner Entfernung wirkten, nicht aufrecht erhalten werden könne. Es entstand so die Aufgabe, die Wirkungssphäre der Molekularkräfte zu messen. In dieser Richtung liegt als erster Versuch der von Plateau (1801—1883) vor mit seiner Seifenlösung und Beobachtung der Interferenzfarben; er fand dabei den maximalen Wert $567 \cdot 10^{-7}$. Die mit direkter Methode gemessenen Werte von Quincke (Pogg. Ann. 137, p. 402, 1869) sind durchweg unter dieser Grenze. Jene Beobachtungen Plateaus (Pogg. Ann. 114, p. 517, 1861) schlossen seine bekannten

Versuche mit Öltropfen in verdünntem Alkohol ab (s. Pogg. Ann. 55, p. 517; 56, p. 167; Erg.-Bd. II, p. 249; 82, p. 387, 1842—1851); sein Rotationsversuch mit Ringabsonderung (in Erg.-Bd. II) gelingt nur, wenn man bei schneller Rotation eine plötzliche Verminderung der Geschwindigkeit eintreten läßt; seine Verteidigung seiner Theorie gegen mehrere Bedenken (Pogg. Ann. 96, p. 210; 100, p. 409; 102, p. 320, u. 99, p. 595) ist nicht überzeugend. Ein Pendant zu den Plateauschen Rotationsversuchen gibt v. Bezold durch die Kohäsionsfiguren, welche er mit hektographischer Tinte in Wasser durch Rotation herstellt (Wied. Ann. 24, p. 27, 1885). Von den zahlreichen Versuchen über die Oberflächenspannung seien noch genannt die von Volkmann (Wied. Ann. 11, p. 177; 17, p. 353), welche die Wilhelmyschen Resultate berichtigen, und die von Röntgen (Wied. Ann. 3, p. 321, 1878), welche ebenfalls Berichtigung bringen.

Die technisch seit unbestimmbar langer Zeit bekannte Ausbreitung von Öltropfen auf Wasser ist untersucht von Sohnke (1842—1897), der die Dicke der Schicht bei der Zerreißungsgrenze maß (Wied. Ann. 40, p. 344, 1890) und die molekulare Wirkungssphäre von Olivenöl und Rüböl feststellte. Die gleichen Messungen der Schicht stellt Röntgen an mit durch Ätherdampf erzeugten Wellen (Wied. Ann. 41, p. 321, 1890). Er stellte dabei Schichten von $56 \cdot 10^{-5}\,\mu$ fest. Allgemein wird dies Problem von Oberbeck (1846—1900) abschließend behandelt (Wied. Ann. 49, p. 366, 1893).

Viskosität.

Untersuchungen mit Kapillarröhren haben wesentliche Dienste geleistet zur Erforschung der Viskosität des Wassers. Die ersten Andeutungen dafür, daß das Wasser eine gewisse Zähigkeit besitze, finde ich bei Gerstner (1756—1832) (Neue Abhandl. der Kgl. Böhmischen Gesellschaft der Wiss. III, p. 141. 1795). Er macht die Beobachtung daß die „Flüssigkeit“ des Wassers wesentlich gesteigert ist durch Erwärmung, und zwar nimmt die „Flüssigkeit“ bei Wärmezufuhr in niederen Temperaturen mehr zu als bei Temperaturen in der Nähe des Siedepunktes. Diese Abhängigkeit ist besonders in engen Röhren gut beobachtbar. Doch erst Poiseuille (1799—1869) hat die „innere Reibung“ genauer untersucht. Für die Bewegung der Flüssigkeit in Röhren hatte allgemein Bernoulli in seiner Hydrodynamik 1738 das Gesetz abgeleitet, daß

$$\frac{p}{\sigma} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{const.}$$

sei, wo p der Druck, σ das spezifische Gewicht der Flüssigkeit, v die Geschwindigkeit und z die Höhendifferenz bedeutet gegen eine Normalhorizontale. Dieser Satz gilt nur für konstanten Querschnitt; tritt eine Veränderung desselben ein, so ist nach Borda (Hist. de l'acad. de Paris 1786) der Arbeitsverlust $(v - v')^2/2g$ hinzuzufügen.

Für Kapillaren hatte Du Buat (1732—1787) zunächst gefunden, daß die Flüssigkeitsmenge, welche durch die Kapillare fließt, proportional dem Druck ist (Principes d'hydraulique etc., Paris 1779). Girard (1765—1836) untersuchte den Einfluß des Querschnitts und glaubte feststellen zu können, daß die Ausflußmenge proportional der dritten Potenz des Durchmessers sei (Mém. de l'acad. Paris 1816), aber Hagen (1797—1884) berichtigte dies, indem er feststellte, daß die Proportionalität sich auf die vierte Potenz des Durchmessers bezog (Pogg. Ann. 46, p. 839, 1839). Nun setzten die Versuche von Poiseuille ein; er bestätigte für enge Röhren das Du Buatsche Ergebnis, fand aber, daß die Ausflußmenge umgekehrt proportional der Länge der Röhre ist, daß dies Gesetz aber nur gültig ist oberhalb einer gewissen Minimallänge, welche für größere Querschnitte erheblich wächst. So ergibt sich das Gesetz

$$V = c \cdot p \cdot d^4 / l \ ,$$

wo V das ausfließende Volumen, p der Druck, d der Durchmesser und l die Länge der Röhre ist. Die Konstante c ist aber eine Funktion der Temperatur, wie Gerstner schon gefunden hatte; Poiseuille schreibt dafür $c = c_0\,(1 + at + bt^2)$, wo a und b für die verschiedenen Substanzen verschiedene Werte haben (C. R. XV, 1842; Mém. des savants étrang. IX, 1846; Pogg. Ann. 58, p. 424, 1843). Die Abhängigkeit von der Temperatur hatte Hagen (l. c.) schon eingehend untersucht. Für Essigsäurelösung fand Wijkander eine eigenartige Temperaturabhängigkeit (Beiblätter III, p. 8, 1879). Für die Konstante c schlug Hagenbach (Pogg. Ann. 109, p. 385, 1860) den Namen Viskosität vor. Diese hängt mit dem von O. E. Meyer (Pogg. Ann. 113, p. 384, 1861) eingeführten Reibungskoeffizienten η durch die Gleichung $c = \frac{\pi}{8\eta}$ zusammen. Der Wert von η ist von Rellstab in seiner Dissertation (Bonn 1868) für mehrere Alkohole sehr genau bestimmt. Warburg zeigte, daß das Poiseuillesche Gesetz auch für nicht benetzende Flüssigkeiten gilt durch Untersuchung mit Quecksilber (Pogg. Ann. 140, p. 367, 1870). Von Brunhes ist das Gesetz auch auf kapillare Schichten aus-

gedehnt (Sur le passage des liquides à travers les substances perméables etc., Toulouse 1881). Die von Meyer, Rellstab und Warburg angegebenen Werte sind auf 1 g als Krafteinheit bezogen, für das CGS-System sind sie mit 981 zu multiplizieren.

Andere Methoden, die innere Reibung zu bestimmen, sind angewendet von Newton (Phil. nat. Princ., p. 303ff., 1687). Er bestimmt den Widerstand durch die Abnahme der Schwingungsbogen eines Pendels. Da die Bogen sehr klein sind, ist die Methode nicht geeignet, gute Werte zu liefern. Bequemer ist Coulombs Messung der Dämpfung einer in der Flüssigkeit schwingenden horizontalen Scheibe (Mém. de l'Instit. nat. 3, p. 246, an. 9 = 1802). Diese Methode ist weiterumgebildet von Stokes (Phil. Trans. Camb. 9, II, 1851). Danach arbeitete O. E. Meyer (Crelles Journ. 59, p. 229, 1861, und Wied. Ann. 32, p. 642, 1887) und Grotrian (1847 bis 1918; Pogg. Ann. 157, 159, 1876 und Wied. Ann. 8, 1879). W. König nahm statt der drehenden Scheiben drehende Kugeln und brachte auch Korrektur wegen des Aufhängefadens an der Formel an (Wied. Ann. 32, p. 194, 1887). Helmholtz benutzt 1860 Hohlkugeln mit der Flüssigkeit gefüllt, an einem Drahte aufgehängt und in Schwingungen versetzt (Ges. Abhandl. I, p. 172). Schöttner beobachtet mit fallenden Gewichten (Sitz.-Ber. Wien 77, p. 61, 1878). Die theoretischen Untersuchungen L. Eulers (Nov. Comm. Petrop. 6, p. 338, 1761) sind für die Frage nicht verwertbar, weil er meint, daß die Teilchen der Flüssigkeit an der Wand des Gefäßes geradeso reiben wie die festen Körper, und daher diese reibenden Teile eine Geschwindigkeit haben nahezu gleich der Geschwindigkeit der strömenden Flüssigkeit.

Diffusion.

Die ersten Beobachtungen über Diffusion wurden von Abt Nollet bei seinen Untersuchungen über die Ursache des Siedens gemacht (Hist. de l'acad. Paris 1748). Er stellte ein mit Weingeist gefülltes Gefäß, durch ein Stück Blase fest geschlossen in ein Gefäß mit Wasser. Nach 5 Stunden fand er die Blase hoch gewölbt, und als er nach dem Herausnehmen aus dem Wasserbehälter in die Blase ein Loch mit einer Nadel stieß, wurde ein Wasserstrahl von 1 Fuß Höhe ausgespritzt. Um sich zu überzeugen, daß der Überdruck durch eindringendes Wasser entstanden sei, machte er das umgekehrte Experiment: Ein durch Blase gedecktes Gefäß mit Wasser wurde in Weingeist gestellt; jetzt wurde die Haut nach innen mit konkaver Fläche gedrückt. Nollet nennt diese Durchdringung

Diffusion. Diese Versuche wurden wieder aufgenommen durch N. W. Fischer (1787—1850; Abh. d. Berl. Akad. 1814/15) und unter dem Titel: Kritische Untersuchungen in Gilb. Ann. 72, p. 300, 1822. Er zeigt den semipermeabeln Charakter der tierischen Membran mit einer Lösung essigsauren Bleies und Kurkumatinktur. Auf ganz ähnliche Weise zeigte Chevreul (1786—1889) den semipermeablen Charakter der Häute (Ann. de chim. et de Phys. 19, p. 51, 1822). Schon vorher hatte Parrot (1751—1812) in seiner Übersicht des Systems der theoretischen Physik (1809—1811) die Osmose auch auf poröse Tonröhren bzw. Zylinder oder Platten ausgedehnt und die Druckhöhen gemessen.

Inzwischen war auch die einfache Diffusion, d. h. die allmähliche Durchdringung zweier sich berührender Flüssigkeiten, untersucht. Berthollet (1748—1822) machte darauf aufmerksam, daß, wenn eine Salzlösung mit Wasser bedeckt ist, ein Diffusionsstrom für jeden horizontalen Querschnitt, dessen Konzentration u, dessen Abstand von der ursprünglichen Grenzschicht z sei, entsteht, der proportional ist dem Quotienten du/dz, d. h. es besteht zwischen der Diffusion und der Wärmeleitung eine Analogie (Essai de statique chimique I, p. 412, Paris 1803).

Es mag zunächst die Untersuchung der Diffusion zu Ende geführt werden, ehe wir auf die zeitlich jetzt folgenden Untersuchungen über Endosmose weiter eingehen. Erst 1850 wurde die Diffusion wieder aufgenommen durch Graham (1805—1869), der in zwei Abhandlungen (Phil. Trans. 1850, I, übersetzt in Lieb. Ann. 77 und 80) zu den drei Sätzen gelangte: 1. Die Diffusionsgeschwindigkeit hängt von der Natur des gelösten Körpers ab. 2. Die Salzmengen, welche aus der Lösung herausdiffundieren, sind der Konzentration proportional. 3. Diese wächst mit der Temperatur. Er fand diese Resultate durch Analyse der Lösung nach verschiedenen Zeiten. Fick maß die Dichte des Wassers in dem weiten Gefäß, in welches diffundiert wurde, in verschiedenen Höhen über der stets gesättigten Lösung am Boden; ist dies hier die Konzentration a, an der Oberfläche des Wassers die Konzentration b und c die Distanz zwischen a und b, so ist die in der Zeiteinheit durch einen Querschnitt gehende Salzmenge gleich $K\frac{a-b}{c}$. Es ändert sich also die Dichte linear (Pogg. Ann. 94, p. 59, 1855).

Sir W. Thomson (1824—1907) maß die Dichte der Schichten durch schwimmende Glasperlen von verschiedenem spezifischen Gewicht (Encycl. Brit. 11, p. 586, 1856). Beilstein (1838 geb.)

konnte mit seiner Methode, wo er die Lösung in einem kurzen, oben geschlossenen U-Rohr in die obere Schicht des Wasserbehälters diffundieren ließ, schnell neue relative Versuche über Diffusion verschiedener Lösungen anstellen. Der Apparat wird noch heute viel im Unterricht gebraucht (Lieb. Ann. 99, p. 165, 1856). Simmler und Wild geben eine neue Methode der Dichtigkeitsmessung bei diesen Diffusionsvorgängen an durch Bestimmung der Brechungsexponenten (Pogg. Ann. 100, p. 212, 1857). Da die Ausführung dieser Methode große Schwierigkeiten bot, änderte Kundt (1838 bis 1894) dieselbe so ab, daß er durch ein prismatisches Gefäß, in welchem die Diffusion stattfand, einen vertikalen Faden beobachten ließ, der der Konzentration entsprechend im Bilde eine Konzentrationskurve darstellt (Johannisjanz, Wied. Ann. 2, p. 24, 1877). Für Zuckerlösung wandte Voit (Pogg. Ann. 130, p. 227, 1867) und Hoppe-Seyler (1825—1895; Mediz.-chem. Untersuch. I, p. 1, Berlin 1876) das Saccharimeter an. Warum die von Kundt vorgeschlagene Methode so abweichende Werte lieferte, hat Stefan (1835—1893) nachgewiesen; er betont, daß man die bei den bisherigen Methoden stets vorausgesetzten stationären Zustände schwer bestimmen könne; man beobachte daher besser, solange noch variable Zustände bestehen. Für diese hat Stefan die Formel in konvergente Reihen entwickelt, woraus man bequem die Diffusionskoeffizienten berechnen kann; er findet sehr gute Übereinstimmung der berechneten Werte für Kochsalzlösung mit den Werten von Graham (Sitz.-Ber. d. Wiener Akad. 77, p. 371, und 78, p. 957, 1878). Eine Demonstrationsmethode mit Interferenzstreifen hat Gouy (C. R. 90, p. 307, 1880) angegeben. Die zuverlässigste Methode gab H. F. Weber (1843—1913) an (Wied. Ann. 7, p. 469 u. 536, 1879). Er maß die Veränderung der elektromotorischen Kraft in den Schichten einer Zinksulfatlösung zwischen Zinkelektroden; dabei sind noch Unterschiede von 0,008 mg für das Kubikzentimeter meßbar. Auch er fand den sehr großen Einfluß der Temperatur, so daß der Diffusionskoeffizient für $ZnSO_4$ dargestellt ist durch die Gleichung

$$K = 0{,}1187\ (1 + 0{,}0557\ t)\ .$$

Graham hatte seine Methode, um Einwendungen zu widerlegen, verbessert und dabei eine wichtige Unterscheidung der Lösungen gefunden (Phil. Trans. 1861 p. 183). Die großen Unterschiede in den Diffusionskonstanten verschiedener Körper veranlaßten ihn, festzustellen, daß am leichtesten kristallinische Substanzen und Flüssigkeiten diffundieren, andere Körper, wie Leim, Gummi, Albumin usw.

dagegen sehr schwer oder gar nicht; für diese letzteren führte er den Namen Kolloide ein. Ferner findet er, daß die Diffusion imstande ist, Salzgemische zu zerlegen, das zeigt er an doppelt schwefelsaurem Kali, welches durch die leichtere Diffusion der Schwefelsäure in neutrales Salz und Schwefelsäure zerlegt wird; er nennt diesen Vorgang Dialyse (l. c. 199). Die Parallele zwischen Diffusion der Flüssigkeiten und der Ausdehnung der Gase ist zuerst von Gay-Lussac (Ann. de Chim. et de Phys. 43, p. 137 1802) ausgesprochen.

Osmose und Endosmose.

Der erste, welcher nach Fischer (s. oben) sich wieder mit der Osmose beschäftigte, war G. Magnus (1802—1870; Pogg. Ann. 10, p. 160, 1827). Er benutzte auch tierische Häute und maß die durch Endosmose entstehende Druckdifferenz. Gleichzeitig begann die lange Reihe von Arbeiten Dutrochets (1776—1847), der zunächst das Endosmometer konstruierte, eine kleine Flasche, deren Boden eine Membran war und in deren Hals eine Glasröhre ragte, die an einer Skala befestigt war. Er füllte die Flasche und Röhre bis zu einer beliebigen Höhe mit Alkohol, stellte die Flasche in ein Gefäß mit Wasser und maß die Zu- oder Abnahme der Höhe in der Röhre; er unterschied die Endosmose von der Exosmose, deren Differenz die Höhe bedingt. Bei der tierischen Membran und Kupfersulfat steigt die Flüssigkeit in der Röhre, bei Alkohol und Kautschuk fällt die Alkohollösung; also ist die Membran entscheidend. Bei gleichen Verhältnissen ist die Stärke der Membran der Dichte der Lösung proportional (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 2, 35, p. 393; 37, p. 191; 49, p. 411; 51, p. 159; 60, p. 337, 1827—1835). Eine große Reihe meist bestätigender Untersuchungen benutzte die gleiche Methode.

Jolly (1809—1884) dagegen richtete seine Versuche so ein, daß er das Gewicht bestimmte und daraus die Dichte oder die Konzentration; er nannte die Wassermenge, welche für 1 g des Körpers durch die Membran fließt, das endosmotische Äquivalent (Pogg. Ann. 78, p. 261, 1849). Daß dasselbe aber nicht konstant ist, hat Eckhard (Pogg. Ann. 128, p. 61, 1866) gezeigt und damit dieses osmotische Äquivalent beseitigt. In dem Dialysator hat Graham ein Instrument konstruiert, mit welchem er Kristalloide von den Kolloiden scheidet (Phil. Trans. 1854).

Die ersten wichtigen Anwendungen der Dialyse für Hygiene sind von Sainte-Claire Deville in seinen Leçons prop. d. l. Soc.

chim. de Paris 1864 et 1865, p. 270, angegeben, darunter der durch Péligot 1864 durch Dialyse ausgesonderte Harnstoff. Die erste technische Verwendung der Osmose im Patent Dubrunfaut 1854 für Ausscheidung der Salze aus der Melasse, wirksam erst durch die Einfügung des Pergamentpapiers 1864.

Scheinbar unabhängig von früheren Entdeckungen fand Traube (1826—1894) in Pflanzenhäuten semipermeable Membranen (Arch. f. Anat. u. Physiol., p. 87, 1867). Die genaue Untersuchung dieser semipermeablen Häute lieferte Pfeffer in großer Ausführlichkeit (Osmotische Untersuchungen 1877). Er studierte besonders den osmotischen Druck und bestätigte das Gesetz $p = a \cdot c \cdot T$, wo c die Konzentration, T absolute Temperatur, a konstant und p der Druck ist. Alle Körper haben bezüglich der Temperatur den gleichen Proportionalitätsfaktor. Er findet den Satz: Mengen gelöster Stoffe, welche im Verhältnis des Molekulargewichts stehen, üben, zu gleichen Volumen gelöst, bei gleicher Temperatur gleichen Druck aus. Damit trat der alte Gay-Lussacsche Gedanke (s. o.) von 1802 wieder hervor, doch erst 10 Jahre später wurde diese Konsequenz gezogen von van't Hoff (1852—1911) in dem Satze: Gelöste Stoffe üben in der Lösung denselben Druck als osmotischen aus, den sie bei gleicher Temperatur und in gleichem Volumen als Gas ausüben würden (Kgl. Svensk. Vet Ak. Hand. 21, p. 58, 1886, und Ztschr. f. phys. Chem. 1, p. 481, 1887). Damit wurden für die Lösungen die Gasgesetze maßgebend, speziell auch die Avogadrosche Regel. Es folgten daraus die vier Grundregeln der Lösungen: Werden in gleichen Gewichtsmengen desselben Lösungsmittels äquimolekulare Lösungen beliebiger Stoffe hergestellt, so haben dieselben 1. gleichen osmotischen Druck, 2. gleiche relative Dampfdruckverminderung, 3. gleiche Schmelzpunktserniedrigung und 4. gleiche Siedepunktserhöhung. Van't Hoff fand, daß die Elektrolyte diesen Gesetzen nicht gehorchen, so daß das allgemeine Gasgesetz $p \cdot v = R \cdot T$ für sie nicht gilt; darum setzt er $p \cdot v = i \cdot R \cdot T$. Dies i ist $= 1$ für alle Nichtelektrolyte, für die Elektrolyte bei hinreichender Verdünnung $= 2, 3, \ldots$; um dies i zu begründen, nimmt M. Planck an, daß in den Elektrolyten eine Anzahl Moleküle dissoziiert seien (Wied. Ann. 32, p. 499, 1887). Das knüpft an einen alten Gedanken von Clausius (1822—1888) an, der in der mechanischen Wärmetheorie zu der Vorstellung kommt, daß in Flüssigkeiten die Moleküle nicht um konstante Gleichgewichtslagen oszillieren, sondern daß sie sich unregelmäßig bewegen und fortgesetzt in neue Lagen kommen, dabei können einzelne Ionen frei werden

und sich nun ebenso selbständig bewegen wie die Moleküle selbst. Daher können solche freie Ionen andere Moleküle wieder zerlegen und andere Ionen frei machen (Pogg. Ann. 100, p. 353; 101, p. 338, 1857). Diese Idee hatte Arrhenius schon 1884 (Bijhang till K. Svensk. Vet. Ak., H. 8, No. 13) wieder aufgenommen und erklärt nun das *i* in der van't Hoffschen Gleichung als das Verhältnis des wirklich vorhandenen Druckes im Elektrolyten zu dem Druck, welcher ohne Dissoziation vorhanden gewesen wäre. Die weitere Fortbildung dieses Ergebnisses gehört in die Elektrizitätslehre (s. u.).

Gase.

Luftdruck.

In bezug auf die Luft bzw. gasförmigen Körper ist man auch in der Renaissance nicht über die Kenntnisse Herons (s. o.) hinausgekommen. Selbst Galilei ist noch ein Anhänger des horror vacui, der ihm allerdings allein nicht ausreicht, die Festigkeit der Körper zu erklären. Die Erfahrung, daß in Pumpen von mehr als 18 Ellen Länge des Saugrohrs das Wasser nicht mehr dem Kolben folgt, wird ihm vom Pumpenmeister in Florenz mitgeteilt (Discorsi e dimonstrazioni etc. 1638 1. Tag Klassiker 11 p. 17) aber er erklärt dies durch das Abreißen eines Fadens durch sein eigenes Gewicht. Andererseits gibt er Methoden an, die Schwere der Luft zu bestimmen, einmal durch Kompression der Luft in einem Ballon die Gewichtszunahme, zum anderen durch Austreibung der Luft bei Erwärmung des Ballons die Gewichtsabnahme festzustellen. Er versucht nicht nur, das absolute Gewicht der Luft, sondern auch das spezifische Gewicht zu bestimmen. Da Heron (l. c.) bereits den Luftdruck kannte, ist Galilei nicht über die Heronschen Kenntnisse hinausgekommen. Torricelli gibt zuerst in einem Briefe an Ricci vom 11. Juni 1644 Kenntnis von seinem Versuch. Er hat darin nicht nur den horror vacui beseitigt und den Druck der Luft gleich dem Gewicht der Quecksilbersäule erkannt, sondern auch ein solches Instrument zur Beobachtung der Luftdruckschwankungen empfohlen. Jedoch hat Descartes schon früher sowohl den horror vacui abgelehnt, als auch das Hängenbleiben einer Quecksilbersäule in einer geschlossenen Glasröhre auf den Luftdruck zurückgeführt in einem Briefe von 1631 der Acad. des scienc. morales et polit. am 6. 3. 1881 vorgelegt, und in einem Briefe vom 8. 10. 1638 an Mersenne (also nach Kenntnisnahme der Galileischen Bemerkung über die

Grenze der Saugfähigkeit der Pumpen bei 18 Ellen) sagt er, daß diese Erscheinung zusammenhänge mit dem Gewicht des Wassers, welches dem der Luft das Gleichgewicht halte.

Pascal (1623—1662) erfuhr durch Mersenne von Torricellis Versuch, welchen er öffentlich wiederholte (Expér. touchant. le vide, 1646). Nachdem er die Torricellische Begründung kennengelernt hatte, entschloß er sich zu der Vergleichung der Barometerhöhe am Fuße und auf dem Gipfel des Puy-de-Dôme und bat seinen Schwager Périer unter dem 15. 11. 1647 um die Ausführung, welche am 19. 9. 1648 ausgeführt, eine Höhendifferenz von 3″ 1,5‴ der Quecksilbersäule ergab (Périer, Brief an Pascal vom 22. 9. 1648). Descartes behauptet, bei einem Besuch bei Pascal ihm diesen Versuch empfohlen zu haben (Brief an Mersenne 13. 12. 1647, an Carcavi vom 11. 6. und 17. 8. 1649). Da der Besuch bei Pascal sicher stattgefunden hat (Brief von Jacqueline Pascal, 25. 9. 1647) und der Brief an Mersenne vor der Ausführung des Experiments geschrieben ist, wird Descartes' Anspruch auf die Idee richtig sein. Die Briefe sind in den Oeuvres der beiden Beteiligten veröffentlicht. Ausführliche Beschreibung des Versuchs im Journ. de Phys. I, p. 171, 1872. Beschreibung der Versuche von Pascal selbst in: Récit de la grande expérience de l'equilibre des liqueurs, Paris 1648. Weitere sinnreiche Experimente und Apparate zum Nachweis des Luftdrucks in Pascal, Traité de la pesenteur de la masse de l'air, 1653 geschrieben, 1663 gedruckt. Pascal gab dem Barometer die Form des Heberbarometers.

Die gleiche Heberform wandte Otto v. Guericke (1602—1686) aber für Wasser an. Das Rohr war 20 Magdeburger Ellen lang, auf der Wasseroberfläche des offenen Schenkels war ein Schwimmer, der durch einen über eine Rolle gehenden Faden eine kleine menschliche Figur hob oder senkte, mit dem ausgereckten Arm zeigte diese auf eine Skala an der Wand des Hauses von Guericke, so daß die Passanten nur diese Figur und Skala sahen, welche schön Wetter, Regen usw. anzeigte. O. v. Guericke nannte das Instrument semper vivum (Exper. Magdeb. de vacuo spatio III, sec. 19 u. 20, 1663 [gedruckt 1672]). Andere nannten dasselbe Anemoskop (Theatr. Comet. Amstelod. 1668, p. 239). O. v. Guericke benutzte dasselbe zur Wetterprognose und sagte 1660 auf Grund des tiefen Fallens einen außerordentlichen Sturm vorher an.

Dieses Guerickesche Instrument mit dem Schwimmer wurde von Hooke (1635—1703) mit Quecksilber nachgemacht. Er verband die Rolle, über welche der Faden lief, mit einem Zeiger, welcher

nun auf einer großen Kreisscheibe das Wetter anzeigte (Micrographie. London 1665). Der Apparat Hookes wird noch jetzt als Zimmerbarometer gebraucht. Der Name Wetterglas oder Torricellische Röhre. wie er anfangs allgemein gebraucht wurde, ist zuerst von Georg Sinclair († 1696) durch den Namen Baroskop ersetzt (Ars nova. Rotterd. 1669), doch setzt sich seit Mariottes Essai sur la nature de l'air 1676 der Name Barometer allgemein durch. Das Auskochen des Barometers ist besonders empfohlen und eine brauchbare Methode dafür angegeben von Deluc (1727—1817) in Recherches sur les modifications de l'atmosphere etc., Genf 1772. Der v. Guerickesche Schwimmer führt zum Barometrographen, indem an dem Schwimmer ein Stift angebracht wird, welcher durch einen von einem Uhrwerk getriebenen Hammer in bestimmten Intervallen gegen eine vom Uhrwerk gedrehte Scheibe gedrückt wird und darauf einen Punkt fixiert (Changeux, Journal de Phys., Nov. 1780). Zahlreiche Abänderungen des Barometers beschreibt Luz (Vollständige Beschreibung von Barometern, Nürnberg u. Leipzig 1784). Um bei Reisebarometern das Eindringen der Luft in die Quecksilbersäule zu verhüten, bringt Gay-Lussac zwischen dem langen und kurzen Schenkel eine Kapillare an (Biot, Traité 1816). Auch der kurze Schenkel ist oben geschlossen und hat eine seitliche Öffnung zur Verbindung mit der äußeren Luft. An diesem haben Bunten und nachher Greiner (Pogg. Ann. 7, p. 33, 1826) Verbesserungen angebracht, indem sie die lange Röhre durch eine kapillare Spitze in die kurze münden lassen.

Die Gefäßbarometer sind von den Mitgliedern der Accademia del Cimento zuerst ausgebildet durch Anschmelzen des Torricellischen Gefäßes an die Röhre und Anbringung einer seitlichen Öffnung. Sie wiederholten die Pascalschen Versuche mit solchen Barometern, sie benutzten auch die Neigung der Röhre, um die Empfindlichkeit der Ablesung zu erhöhen (Saggi, Ausgabe von Antinori 1841, l. II). Antinori erwähnt dabei (p. 29), daß Berigard in seinem Circulo Pisano, Undine 1643, gesagt habe, daß das Barometer am Fuße eines Berges oder Turmes ein geringeres Vakuum habe als an der Spitze. Das Werk ist mir nicht zugänglich, ich kann darum nicht nachprüfen, ob das auf Beobachtung beruht, oder ob es nur eine andere Ausdrucksweise ist für die Bemerkung Torricellis in dem Briefe an Ricci, daß die Luft am Erdboden am schwersten sei und beim Aufstieg immer leichter werde. — Um bei dem Gefäßbarometer eine richtige Ablesung der Höhe zu ermöglichen, mußte das Niveau des Quecksilbers im Gefäß stets die gleiche Höhe haben.

Dies erreichte van Magellan dadurch, daß er das Gefäß unten durch einen ledernen Beutel abschloß, welcher durch eine in dem umschließenden Holzkasten angebrachte Schraube zusammengedrückt werden konnte, so daß das Niveau stets auf gleiche Höhe eingestellt werden konnte. Er sagt, für Reisen soll man diese Zusammendrückung so groß machen, daß das Quecksilber die Röhre ganz füllt, so daß keine Luft eintreten kann (Beschreibung neuer Barometer, Leipzig 1782). Diese van Magellansche Erfindung ist bekanntlich in das noch heute viel gebrauchte Fortinsche Reisebarometer übergegangen.

Daß bei allen Barometern Temperaturkorrektion notwendig ist, wurde wohl zuerst von Amontons (1663—1705) (Remarques et expériences physiques etc., Paris 1695) bemerkt, doch sind darauf bezügliche Tabellen, welche für Barometerhöhen von 23—29″ zwischen 0 und 20° R die Korrektionen angeben, zuerst von Winkler (Halle 1820) herausgegeben. Für die Gefäßbarometer kommt immer noch die Korrektion wegen der Kapillarität hinzu, die von Delcros (Mém. de l'ac. Brüssel XIV) und Bravais (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, 5, 1842) in Tabellenform gegeben sind.

Das Prinzip der statischen Barometer ist schon von Samuel Moreland (Musschenbroek, Introductio ad phil. nat. II, § 2078) 1670 angegeben, indem das Barometerrohr der Torricellischen Anordnung an einen Wagebalken angehängt wird und durch die Gewichtzu- oder -abnahme das Steigen oder Fallen gemessen wird. Dieses Gewichtsbarometer machte Arthur Macquire (Trans. of the R. Irish. Ac. 4, c. 8, 1791) zu einem Barographen, indem er an dem anderen Wagebalken einen Bleistift befestigte, der die Schwankungen auf einen durch Uhrwerk gezogenen Papierstreifen aufzeichnete. Der 1867 auf der Pariser Ausstellung viel bewunderte Barograph von Secchi ist im Prinzip nichts anderes als dieser von Macquire, nur die Anbringung des Zeichenstiftes war eine bessere. Ein wesentlich anderes Prinzip der Registrierung hat der Barograph von Sprung (Ztschr. f. Instrumentenk. 6, p. 189, 1886), indem durch elektrische Kontakte des anderen Hebelarms das Laufgewicht, welches das Barometerrohr im Gleichgewicht hält, selbsttätig eingestellt wird und seine Verschiebung registriert.

Sehr viel empfindlicher als die Quecksilberbarometer sind die Aneroidbarometer, deren erstes von Vidi 1844 konstruiert wurde. Die Idee aber stammt von Leibniz, 21. 6. 1697 in einem Briefe an Papin (Gerland, Leibnizens und Huygens' Briefwechsel mit Papin, Berlin 1881, p. 122). Vidi wandte eine feste Metall-

büchse mit sehr dünnem kreisförmig geriffelten Deckel an, die luftleer gemacht war; ein Stift in der Mitte drückte auf eine Zeigervorrichtung. Durch Aufeinanderlegen mehrerer solcher Kapseln ist in diesem Barometer eine außerordentlich große Empfindlichkeit erreicht. (Da in französischen, aber auch einigen deutschen Lehrbüchern der Name Aneroid falsch erklärt wird, sei bemerkt, daß er aus α privativum und νηρός = naß, feucht, gebildet ist.) Eine andere Art von Aneroidbarometern konstruierte Bourdon (1779—1854) nach Anleitung seines Metallthermometers mit einer luftleeren, kreisrunden, dünnen Röhre, die bei stärkerem Luftdruck sich stärker krümmt, so daß die freien Enden der Röhre einen Hebel drehen, der einen Zeiger bewegt (C. R. 37, p. 656, 1853). Natürlich können diese Metallbarometer sehr bequem zu Barographen gemacht werden, z. B. Rédiers Patent vom 19. 9. 1872, aber sie bedürfen von Zeit zu Zeit einer Vergleichung mit dem Quecksilberbarometer.

Barometrische Höhenmessung.

Schon Torricelli sprach die Idee aus (l. c.), durch Messung der Quecksilbersäule die Höhe des Ortes zu bestimmen; ausführlich kommt Pascal in seinem posthumen Traité de l'équil., 1663, p. 172, auf diese Idee zurück; aber er gibt keine Methode an, wie man die Höhe finden könne. War Pascal in die Höhe gestiegen mit seinem Barometer, so stieg Sinclair (Ars nova et magna gravitatis etc., Roterd. 1669, p. 128) in die Tiefe der Bergwerke, um die Druckzunahme zu messen. Auch er redet von dem inversen Problem, ohne es zu lösen. Das versucht Mariotte (1620—1684), aber seine zu geringe mathematische Bildung läßt den Versuch mißlingen. Er findet am Boden des 84′ tiefen Kellers der Pariser Sternwarte eine Druckzunahme von etwa $^4/_3{}'''$, beim Besteigen des Notredameturms hat er bei 84′ die gleiche Abnahme; er rechnet so mit einer gleichmäßigen Abnahme um 1‴ bei 60′ Erhebung. Da das Barometer 28″ auf der Oberfläche anzeigt und er Differenzen von $^1/_{12}{}'''$ zu messen imstande ist, hat er also $4032 = 28 \cdot 12 \cdot 12$ Schichten. Er erwartet also bei der 2016. Schicht noch 14″ Druck. Die unterste Schicht hat 5′ Höhe, die nächste danach $5 \cdot \frac{4032}{4031}$ und so fort, die 2016te hat 10 als Höhe. Diese Reihe behandelt er als arithmetische Reihe und schreibt die Summe $= 2016 \cdot 7{,}5'$ (Essai de la nature de l'air 1676, Oeuvres I, p. 174, 1740). Edm. Halley (1656—1742) leitet den richtigen Grundstock für die Höhenbestimmungsformeln

ab, indem er von den spezifischen Gewichten ausgeht und annimmt, daß 1″ Quecksilber 900′ Luft trägt und auf ebener Erde ein Druck von 30″ als normal angesehen werden darf, dann formuliert er folgende Regel. Man suche die Differenz der Logarithmen der Barometerhöhe bei 30″ und der in der beobachteten Barometerhöhe in Zollen, multipliziere mit 900 und dividiere durch 0,0144765 (Phil. Trans. 1686, p. 104), oder, wie er auch in Buchstaben schreibt: $Z = \frac{1}{a} \log \text{nat.} \frac{P}{p}$; wo Z die Höhe ist. D. h. während die Höhen in arithmetischer Weise wachsen, nimmt der Luftdruck in geometrischer Progression ab. An dieser Gleichung galt es nur die notwendigen Korrektionen anzubringen. Der erste Versuch neben einer einwandfreien Ableitung der Grundformel die Temperatur zu berücksichtigen bei der Höhenmessung rührt von L. Euler her (Nov. Comm. Petrop. 13, p. 378, 1769), in einer Arbeit über das Gleichgewicht von Flüssigkeiten, die bereits 1766 der Akademie vorgelegt war. Deluc führt die Temperaturkorrektion wirklich ein (Recherches s. l. mod. de l'atm. etc., Genf 1772, II, p. 109). Die vielen inzwischen veröffentlichten verkehrten Formeln übergehe ich. Halleys Arbeit scheint wenig beachtet zu sein; erst Bouquer stellte sich wieder auf Halleys Standpunkt (1749). Aus der großen Zahl von Arbeiten, die der Höhenformel gewidmet sind, hebe ich folgende heraus: Ramond, Mém. s. l. form. baromét." etc., Clermont-Ferrand 1811, mit einer einwandfreien Ableitung; Bessel in Pogg. Ann. 36, p. 187, 1835.

Schon Ramond wußte, daß die Tageszeit einen bedeutenden Einfluß auf die Richtigkeit der Höhenberechnung hat; die tägliche Periode ist besonders durch von Bauernfeind in einer größeren Anzahl Abhandlungen untersucht auf Grund seiner vielen Versuche im bayrischen Hochlande (Beobacht. u. Untersuch. über die Genauigk. barometr. Höhenmessungen, München 1862; Elemente d. Vermessungskunde II, 5. Aufl., p. 391ff., 1879). Zusammenfassende Darstellung gibt Rühlmann (Die barometrische Höhenmessung usw., Leipzig 1870).

Elastizität der Luft.

Für die Ableitung der Gesetze der Aerostatik war schon die von Heron gekannte Elastizität der Luft von Bedeutung. Nahezu gleichzeitig und unabhängig von dem Nachweis der Schwere der Luft durch Torricelli ist die Elastizität der Luft von Otto von Guericke (1602—1686) erkannt und bewiesen. Guericke hat

seine Versuche nicht einzeln bekannt gemacht, sondern in dem Sammelwerk, welches er unter dem Titel: Ottonis de Guericke Experimenta nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo spatio etc., Amsterdam 1672 herausgab. Das Buch war am 14. 3. 1663 beendet (Schluß der Vorrede), aber die Verhandlungen mit dem Verleger Joh. Jansson und der Druck zögerte das Erscheinen so lange hinaus. Ein großer Teil der Versuche war aber schon von dem mit ihm befreundeten Kaspar Schott (1608—1666) herausgegeben in Mechanica hydraulico-pneumatica, Herbipoli 1657, und Physica curiosa 1662, und anderweit durch öffentliche Vorführung bekannt geworden. Guericke versuchte, aus einem vollständig gefüllten Gefäß mit Wasser durch Pumpen Wasser herauszuziehen, um einen luftleeren Raum zu erzeugen. Das Mißlingen dieses Versuches veranlaßte ihn, den Versuch mit einem nur Luft enthaltenden Gefäß zu wiederholen. So kam Guericke auf die Luftpumpe, bei welcher der Rezipient bereits von der eigentlichen Pumpe abhebbar und durch ein Ventil abschließbar war. Das Einströmen der Luft in einen solchen Rezipienten nach Öffnung des Hahnes bewies ihm die Elastizität der Luft. Um die Verbindung zwischen Rezipienten und Pumpenstiefel luftdicht zu machen, stellte er diesen Teil des Apparates unter Wasser. Er nannte die Pumpe antlia pneumatica. Die bekannten Magdeburger Halbkugeln von 0,67 Ellen Durchmesser führte er auf dem Reichstage in Regensburg 1654 öffentlich vor und erregte dadurch das Interesse weitester Kreise für seine Erfindung. Wann er diese Pumpe zuerst konstruierte, ist nicht mit Sicherheit festzustellen. Nach den Angaben seines Urenkels von Biedersee müßten die ersten Versuche in den Jahren 1632—33 gemacht sein. Eine späte Notiz läßt das Jahr 1641 als spätesten Termin zu. Chr. Kramp schreibt am 20. floréal VII (1799) an Hindenburg: In Cölln selbst ist bereits eine artige Sammlung physikalischer Sachen: eine Guerickesche Luftpumpe, von ihm selbst gemacht und im Jahre 1641 dem Magistrate von Cölln zum Präsent geschickt, eine neue Nolletsche usw. (Arch. f. d. rein. u. angewandte Math. von Hindenburg, Heft 10, p. 232, 1799). Im Jahre 1883 angestellte Nachforschungen in Köln sind resultatlos verlaufen, die Maschinen sind scheinbar sämtlich verschwunden, was bei der auf 1799 folgenden Franzosenzeit ja nicht auffällig ist. Gerland hat sich sehr darum bemüht, eine echte Guerickesche Pumpe aufzufinden (Beiträge zur Geschichte der Physik, Halle 1882); wahrscheinlich ist die früher in der Berliner Bibliothek aufbewahrte Pumpe wirklich von Guericke (jetzt im Deutschen Museum in

München). Die Maschine ist eine Zweihahnpumpe, der Kolben wurde durch einen Hebel bewegt, ein Ventil ist zwischen Rezipienten und Pumpenstiefel, ein zweites stellt die Verbindung des Stiefels mit der äußeren Luft her. Diese Berliner Pumpe ist aber die zweite Form der Guerickeschen Pumpen (cf. Ahrens, Arch. f. Gesch. d. Nat. u. Techn. 1, p. 2, 1917). Durch zahlreiche Versuche bewies Guericke, daß die Elastizität der Luft für diese Experimente die Erklärung liefere. Es ist sehr bezeichnend für die nationalistische Art mancher englischer Autoren, daß Priestley als Erfinder der Luftpumpe Robert Boyle nennt, während Boyle (1627—1691) selbst ausdrücklich sagt, daß Guericke der Erfinder sei (New Experiments, Physico-Mechanical, etc., Oxford 1660, p. 3). Auch die zahlreichen Experimente, welche er mit der Pumpe ausführt, sind nicht wesentlich von denen Guerickes verschieden; so hat auch Guericke das oft Boyle zugeschriebene Experiment mit der Schlaguhr im Rezipienten, um nachzuweisen, daß der luftleere Raum die Schallwellen nicht leitet, schon ausgeführt. Neu sind aber die Verbesserungen an dem Mechanismus der Pumpe: Statt des Hebels zur Bewegung des Kolbens nimmt Boyle die Zahnstange, welche durch ein Zahnrad hin- und herbewegt wird, und zweitens richtet er den Rezipienten mit abnehmbarem Deckel ein, um in die bauchige Flasche bequem alle möglichen Gegenstände einführen zu können. Boyle hat auch ein Manometer als seine Erfindung bekannt gemacht (Phil. Trans. 14, p. 231, 1679), das tatsächlich von Guericke (l. c., p. 100) erfunden ist. Es ist das die bekannte, oft Dasymeter genannte Vorrichtung, wo an einem Wagebalken eine große evakuierte Glaskugel durch ein kleines Laufgewicht äquilibriert ist; wird die Luft leichter, so sinkt die Kugel, steigt das Barometer, so steigt auch die Kugel. Wenn auch dies Manometer von Guericke zunächst für den Rezipienten der Luftpumpe als Probe gedacht war, wozu es ja noch heute benutzt wird, so hat er doch ganz recht, daß der Apparat auch, wenn auch nur wenig empfindlich, die Schwankungen des Luftdruckes anzeigt. Guericke dehnte damit das Archimedische Prinzip zum ersten Male auch auf Gase aus. Diesen Apparat nannte Boyle wohl in Anlehnung an Sinclairs Benennung des Barometers (s. o.) „statisches Baroskop“.

Im Jahre 1661 kam Huygens nach London und sah Boyles Luftpumpe. Er baute sich Ende Dezember desselben Jahres selbst eine solche Pumpe, aber ersetzte den festen Rezipienten durch den Teller mit aufgestelltem Rezipienten und der Barometerprobe.

Die letztere war ein kleines Manometer, dessen geschlossener Schenkel ganz mit Quecksilber gefüllt waren (Brief an Papin, s. Huygens, Opera omnia II, p. 770). Die Versuche, welche er damit anstellte, beschreibt er selbst im Journal des Scavants, 1672, 25. Juli. In bezug auf die Barometerprobe muß noch bemerkt werden, daß es ein Manometer schon vorher gab; ein solches kommt bereits bei Guericke vor, bei welchem in dem U-förmigen Rohre, dessen einer Schenkel geschlossen war, in beiden Schenkeln Quecksilbersäulen gleicher Höhe waren. So stand also die in dem geschlossenen Rohre abgesperrte Luft unter dem Luftdruck. Boyle ließ in dem geschlossenen Schenkel eine Luftblase von geringem Druck, während in der Barometerprobe überhaupt keine Luft in dem Schenkel sein sollte.

Dionysius Papin (1647—1712 oder 1714) baute sich 1674 eine Luftpumpe, bei welcher er die zwei Hähne der bisherigen Pumpen durch den doppelt durchbrochenen Hahn ersetzte, der nur beim Niedergang des Kolbens um 90° gedreht zu werden braucht (Expériences du vuide etc., Paris 1674). Diesen doppelt durchbrochenen Hahn wandte auch W. Senguerd (1646—1724) bei seiner Luftpumpe an, die er in Phil. naturalis, 1681, beschreibt. Der Hahn sollte also nach Papin, nicht nach Senguerd benannt werden. Im Jahre 1676 ersetzte Papin die Hahnluftpumpe durch eine Ventilluftpumpe, wo das Ventil aus Lammfell gebildet war. Aber noch eine zweite Verbesserung stammt aus diesem Jahre; er konstruierte eine zweistieflige Ventilluftpumpe, bei welcher die beiden Kolben an einem über ein Rad geführten Tau befestigt waren (Leibnizens und Huygens' Briefwechsel mit Papin von Gerland, 1881, p. 10ff.; cf. Papin, A continuation of the new digester, 1687). Hooke ersetzte dies Tau über dem Rade durch zwei Zahnstangen, die durch ein gemeinsames Zahnrad getrieben wurden (1679, Lect. Cutler). In dem Kolben hatte Chr. Sturm (1635 bis 1707) bereits ein Ventil angebracht, welches beim Hineindrücken des Kolbens in den Stiefel sich öffnete, so daß er nur einen Hahn zwischen Rezipienten und Stiefel nötig hatte (Colleg. curios., Nürnberg 1676, p. 100).

Während Guericke seine Pumpe auch zum Komprimieren benutzte, baute Boyle eine eigene Kompressionspumpe, die im Prinzip den modernen völlig entspricht (Experiment. nov. phys.-mechan. continuatio II, 1686, p. 5).

Die Möglichkeit, mittels der Pumpen größere Räume luftleer zu machen, zeitigte schon damals Vorschläge zur Luftschiffahrt. Der

erste Vorschlag geht von Lana aus Prodromo, ovvero Saggio di alcune invenzioni nuove etc., Brescia 1650, p. 52) und wurde von Sturm in seinem Colleg. curiosum, tentamen, ins Lateinische übersetzt und erweitert; vier Kupferkugeln mit $^1/_{23}'''$ Wandstärke von je 20′ Durchmesser sollten luftleer gemacht werden, mit Seilen an einem leichten Schiffchen befestigt sein, in welchem auch Personen aufsteigen könnten.

Die Verbesserungen an der Kolbenluftpumpe beziehen sich auf die Beschränkung des sogenannten schädlichen Raumes, der unterhalb des Kolbens bis zum Boden liegt, so daß das Ventil im Kolben gar nicht mehr gehoben wird. Diesen Übelstand will der Babinetsche Hahn beseitigen mit seiner dreifachen Durchbohrung, so daß der eine Stiefel den anderen auszupumpen benutzt werden kann. Um das gleiche auch für die zweistiefelige Hahnluftpumpe zu leisten, konstruierte Graßmann den nach ihm benannten Hahn. Eine wirkliche Beseitigung des schädlichen Raumes erreicht Kravogl dadurch, daß er den Stiefel umkehrt und über dem Kolben eine Quecksilberschicht anbringt, die durch den Kolben bis durch das oben liegende Ausflußventil gedrückt wird und so alle Luft wirklich austreibt (Pogg. Ann. 117, p. 606, 1862). Dieselbe Idee ist von Cailletet (Ann. de chim. et de Phys., Ser. 5, 29, p. 153, 1883) nachempfunden.

Die Vorteile einer zweistiefeligen Luftpumpe vereinigte Bianchi in seiner einstiefeligen, auf der Pariser Ausstellung 1855 vorgeführten Pumpe, in welcher der unter und über dem Kolben liegende Teil des Stiefels durch Röhren und den Dreiweghahn mit dem Rezipienten verbunden sind; für den unteren Teil ist das Auslaßventil im Kolben, für den oberen in dem Deckel des Stiefels. Die Bewegung des Kolbens geschieht durch Schwungrad mit Zahnräderübersetzung. Nach dem gleichen Prinzip ist die einstiefelige, doppelt wirkende Pumpe von Deleuil (C. R. 1865) mit geringen Verbesserungen gebaut.

Es lag nahe, auch die Torricellische Leere in größerem Maße darzustellen, um das Vakuum zu untersuchen. In der Tat haben die Mitglieder der Accademia del Cimento diesen Gedanken ausgeführt (Saggi di naturali experience etc., II. Ausg. 1841). Sie erweiterten den oberen Teil der Torricellischen Röhre zu einem Gefäß, welches durch einen Deckel abgeschlossen werden konnte, so daß sie in den leeren Raum allerlei Gegenstände, z. B. Tiere, Schlaguhren, Wasserbehälter usw., bringen konnten. Sie bemerkten auch, daß man durch Neigen der Röhre den leeren Raum mit Queck-

silber füllen kann. Jedoch war diese primitive Einrichtung zu wenig brauchbar und die Erfolge der Kolbenpumpe haben die Anwendung der Torricellischen Leere lange zurückgehalten. Ein großer Fortschritt wurde von Svedenborg, der bekanntlich auch die Kosmogonie in den Grundzügen aufstellte, welche gewöhnlich Kant zugeschrieben wird, erreicht (1722, Miscellanea observa. etc., p. 101, Leipzig). Die Glasglocke ruhte auf einer Tischplatte (Teller) und war durch ein Rohr mit einem unterhalb der Tischplatte befestigten eisernen Gefäß verbunden. Ein Hahn in dem Rohre konnte die Verbindung absperren. Aus dem Eisengefäß führte ein Eisenrohr nach unten und dies war durch einen Lederschlauch mit einer längeren, beweglichen Eisenröhre verbunden. Durch Heben und Senken dieses Eisenrohres konnte das Eisengefäß gefüllt oder entleert werden von Quecksilber, da das Eisengefäß einen zweiten Hahn hatte, der in die Atmosphäre mündete. Sehr viel roher war die Quecksilberpumpe von Joseph Baader (Hübners phys. Taschenbuch 1784, p. 650), wo an das Eisengefäß ein nach oben gebogenes Rohr unbeweglich anschloß; an der Biegungsstelle war ein Hahn, durch welchen man so viel Quecksilber ablaufen ließ, daß das Gefäß leer wurde; dann füllte er wieder Quecksilber nach durch das Rohr.

Erst das Bedürfnis nach stärkerer Leere als sie die Kolbenpumpe brachte, führte zur Wiederaufnahme dieser Versuche. Die erste Quecksilberluftpumpe zeigte Geißler 1857 in Berlin vor (cf. Th. Meyer über das geschichtete elektr. Licht, Berlin 1858; Pogg. Ann. 117, p. 610, 1862); sie enthielt bereits den beweglichen Behälter, den verbindenden Kautschukschlauch, die Barometerröhre mit der birnförmigen Erweiterung und den durch Glashähne gesicherten angeschmolzenen Glasröhren mit Trockengefäß. Geißler selbst verbesserte seine Pumpe so, daß während die erste Konstruktion einen Minimaldruck von 0,11 mm lieferte, die neue Form schon bis auf 0,0082 mm kam. Sehr viel mehr leistete die Pumpe von Töpler (Dingl. Journ. 163, p. 426, 1862); sie lieferte 0,000012 mm Druck. Um die große Zerbrechlichkeit der Glasröhren und besonders der Glashähne zu vermeiden, ersetzte Jolly diese gefährdeten Teile durch Stahlrohre mit Hähnen (Repert. f. phys. Techn. 1, p. 144, 1866). Das Eindringen des Quecksilbers in das obere Reservoir beim Heben des unteren Gefäßes bedingt eine Gefahr für die Glasteile; sie zu vermeiden, hat Neesen neben diesem Reservoir eine Verbindungsröhre zwischen dem unteren und oberen Rohre parallel eingeführt (Wied. Ann. 3, p. 608, 1878), die von allen folgenden Konstruktionen beibehalten ist.

Um das Heben und Senken des Quecksilbergefäßes zu vermeiden, veränderte Poggendorff (1796—1877) die Geißlersche Pumpe so, daß die beiden Gefäße starr miteinander verbunden waren; dann wurde durch eine Kolbenpumpe die Bewegung des Quecksilbers besorgt (Pogg. Ann. 125, p. 151, 1865). Die gleiche Einrichtung ist verschiedentlich wiederholt. Auf sinnreiche Weise hatte Hindenburg (Antliae novae etc., Leipzig 1787) das Heben und Senken des Quecksilbergefäßes vermieden. Unter dem Teller, durch einen Hahn abschließbar, befindet sich ein weites Glasgefäß A, welches in ein U-förmiges Rohr ausläuft. Der andere Schenkel dieses Rohres mündet in einen Pumpenstiefel, dessen Volumen gleich dem des Glasgefäßes ist. Pumpenstiefel und Rohr werden mit Quecksilber gefüllt; der doppelt durchbrochene Hahn wird so gestellt, daß das in der Pumpe heruntergedrückte Quecksilber die Luft aus dem Glasgefäß vertreibt. Der Hahn wird nun zur Verbindung mit dem Rezipienten gedreht und der Kolben in die Höhe gezogen; dann entsteht die Luftverdünnung in A. Eine Verbindung der Quecksilberpumpe mit einer Hilfspumpe (Wasserluftpumpe) ist auch bei der automatischen Pumpe von A. Schuller (Wied. Ann. 13, p. 528, 1881) vorgesehen, aber zu einem anderen Zwecke, nämlich einen kontinuierlichen Betrieb herzustellen durch automatisches Drehen des Dreiweghahns und teilweise Evakuierung des beweglichen Gefäßes, welches dann durch ein Gegengewicht in die Höhe gezogen wird. Dies Schullersche Prinzip ist von Raps (Wied. Ann. 43, p. 629, 1891) mit einer Töplerschen Pumpe auf sinnreiche Weise verbunden, indem die Umstellung des Dreiweghahnes durch eine Wippe, auf welcher das untere Quecksilbergefäß durch ein Laufgewicht balanciert ist, besorgt wird. Diese Rapssche Konstruktion arbeitet sehr zuverlässig, ohne besondere Wartung. Um die bei den Quecksilberpumpen mögliche, außerordentliche Luftverdünnung messen zu können, hat Mac Leod einen eigenartigen Druckmesser konstruiert, der bei den neueren Pumpen eingebaut ist (Phil. Mag. 48, 1874).

Auf ganz andere Prinzipien gründet sich die Wasserstrahlpumpe. Schon aus dem Altertum kam die Kunde, daß ein Wasserstrahl die umgebende Luft mitreißt, daß er Wind verursacht (Heron). Auf dieser Grundlage baute Sprengel seine erste Wasserstrahlpumpe auf, in welcher aus einer engeren Röhre ein Wasserstrahl in eine weitere, mit einem seitlichen Röhrenstutzen versehene Röhre strömte, die Luft mitriß und dadurch Luft aus dem seitlichen Stutzen ansog (Chem. Soc. Journ. 3,

1865). Es war also ein kontinuierlicher Wasserstrom, welcher die Luft seitlich mitreißt und so durch den Stutzen einen angeschlossenen Rezipienten leerpumpt. Läßt man den Wasserstrahl in ein geschlossenes Gefäß fallen und den Stutzen mit der freien Luft verbunden sein, so erzeugt man in dem Gefäß einen starken Überdruck, der ein Gebläse treiben kann. Das Wasser wird durch diesen Überdruck mittels einer bis nahe an den Boden reichenden Glasröhre entfernt. Natürlich kann man statt Wasser auch Quecksilber fallen lassen. Letzteres wandte Sprengel (1834—1909) in der intermittierenden Quecksilberpumpe an (Phil. Mag. 45, 1873), in welcher mit dem Prinzip der Quecksilberpumpe ein Fallrohr verbunden ist. In dies dringt das Quecksilber durch eine kapillare Öffnung tropfenweise ein und reißt aus dem Rezipienten so Luftblasen mit sich. Wird zwischen Rezipient und Fallrohr ein kleines Gefäß mit Phosphorsäureanhydrid und eine Röhre mit Selen eingeschaltet, so absorbiert man auch die Quecksilberdämpfe und erreicht dann sehr starke Verdünnungen (Gimingham, Proc. of the Roy. Soc. 25, p. 396, 1875, und Vacuum Pump, London u. New York 1881). Crookes (1832—1911) erreichte damit Verdünnungen auf 0,000046 mm. Später hat Rood sogar 0,000008 und 0,0000069 erreicht (T. New York Times, 19. Nov. 1880, p. 2). Die Langsamkeit der Wirkung einer solchen Sprengelschen Pumpe kann man dadurch verringern, daß man statt eines Fallrohres deren drei verwendet. Der von Babosche Versuch, durch Vorschalten einer Wasserstrahlpumpe die Arbeit der Quecksilberpumpe zu erleichtern, führt durch die eindringenden Wasserdämpfe nicht zu solchen Verdünnungen (Ber. d. naturf. Ges. Freiberg 2, Heft 3, p. 1, 1876). Auf sehr einfache Weise hat Prytz (Wied. Ann. 42, p. 191, 1891) sich eine intermittierende Quecksilberpumpe konstruiert, indem er aus einem weiten Rohr durch einen seitlichen Ansatz Tropfen in das Fallrohr durch Überlaufen eintreten ließ.

Auch die Giminghamsche Einsetzung dreier Fallröhren brachte noch nicht die gewünschte Beschleunigung der Evakuierung; darum betrat F. Schulze-Berge mit seinem Bruder eine neue Bahn, die der Quecksilberrotationspumpe, in welcher ein Ring oder eine Spirale, die einen Quecksilberfaden von etwa einem Drittel des Umfanges enthält, in Rotation versetzt wird. Mit Hilfe eines Dreiweghahnes oder einer peripherisch eingesetzten Spirale wird der übrige Teil des Ringes ausgepumpt. Die Ersetzung des Hahnes durch dies spiralische Ventil hatte schon Clerc sich durch ein Patent 36447 für Deutschland sichern lassen (Wied. Ann. 50, p. 368, 1893).

Diese Rotationspumpe ist die Vorstufe für die modernen Rotationspumpen.

War durch Guerickes und Boyles Versuche auch die Elastizität der Luft nachgewiesen, so fehlte es doch nicht in jener Zeit an Männern, die sich nicht davon überzeugen konnten. Als solcher trat besonders hervor der Lütticher Professor F. Linus (1595—1675) (De experimento argenti vivi tubo vitreo inclusi etc., London 1660). Durch die Beobachtung, daß, wenn er das Barometerrohr oben statt durch Glas durch seinen Finger schloß, die Haut in das Rohr hineingezogen wurde, glaubte er, die Erscheinung so erklären zu können, daß unsichtbare Fäden (funiculi) die Quecksilbersäule mit der Haut verbänden und so diese Säule von der Haut getragen würde. Der Kampf gegen diese Ansicht trieb Boyle zu den Experimenten, welche ihm das Gasgesetz hätten enthüllen müssen (Defensio de elatere et gravitate aëris etc., London 1661, 2. Aufl. Rotterdam 1669, p. 103). Er nahm ein U-förmiges Glasrohr mit einem kurzen geschlossenen und langen offenen Schenkel, füllte zunächst nur so viel Quecksilber ein, daß es in beiden Schenkeln gleich hoch stand, der Raum im geschlossenen war 12″; er goß in die offene Röhre so viel nach, daß das Gasvolumen 6″ betrug; die Höhendifferenz der Quecksilbersäulen war 29″; fügte er noch einmal 29 Zoll hinzu, so war das Luftvolum auf 4″ gesunken. In der ersten Auflage hatte Boyle die Gesetzmäßigkeit seiner Experimente nicht erkannt. Aber diese veranlaßten einen „ingeniosus" Herrn Townley in Lancaster, die Versuche zu wiederholen, und er war es, der dann brieflich Boyle mitteilte, daß die Ursache der Erscheinung die Elastizität der Luft sei und daß man durch die genaue Messung feststellen könne, daß die Luft an elastischer Kraft bei der Ausdehnung so viel verliere, wie sie an Ausdehnung gewinne, und ebenso wenn sie komprimiert wird, in demselben Verhältnis an Elastizität (Druck) gewinnt, wie sie an Volumen verliert. Townley hatte hinzugefügt, er wolle dieses Resultat selbst veröffentlichen. Da sich dies verzögerte und „die weite Entfernung eine Verständigung erschwerte", veröffentlichte Boyle nun das Townleysche Gesetz und redet auch weiterhin immer von dem Townleyschen Gesetz, hat auch an Brounker (Präsident der R. S.) dies Gesetz mit Townleys Namen mitgeteilt. Priestleys Erzählung, daß Townley ein Schüler Boyles gewesen sei, entspricht nicht dem Bericht Boyles. Auch Gerlands Behauptung (Gasgesetze u. der absol. Nullpunkt, 1909, p. 50), daß Boyle selbst erst das Gesetz ausgesprochen habe in allgemeiner Form, ist mit dem Wortlaut bei Boyle unvereinbar. Man soll

doch nicht päpstlicher als der Papst sein. Boyle nennt es dauernd das Townleysche Gesetz. Auf Boyles Bitte hatte Townley auch die Pascalsche Höhenbeobachtung mit dem Barometer in Lancaster wiederholt (ib. p. 82). Die Tabelle jener exakten Versuche zeigte ihm, „daß sich die Luft nach dem Verhältnis der zusammendrückenden Kraft verdichte" und das inverse Experiment mit einer aus einem Quecksilbergefäß herausgezogenen Röhre, in welcher ursprünglich ein Luftvolum von Atmosphärendruck von 1″ Höhe eingeschlossen war, lehrte ihn das Gesetz: „Die Elastizität verhält sich umgekehrt wie das Volumen." Boyle meint dabei, die Luft verhalte sich wie ein Haufen Schafwolle, ein Beispiel, welches schon Pascal (l. c.) gebrauchte; ebenso beruft er sich auf die von Guericke schon angezogene Luftbüchse, die nach Angabe von Musschenbroek (Introductio ad phil. nat. II § 2112, 1748) schon 1474 bekannt gewesen ist. In der Continuation of new experiments (1682) hat Boyle dann auch das noch heute übliche Manometer bei der Luftpumpe sowohl für Evakuierung wie für Kompression eingeführt als Merkurialzeiger.

Der Apparat, mit welchem Mariotte (1620—1684) dasselbe Gesetz wie Boyle ableitete (De la nature de l'air, 1676, p. 149), war identisch mit dem Boyleschen. Auch bei seinen Versuchen war das Luftvolumen in der geschlossenen Röhre 12″ (aber Pariser). Er komprimierte auf 8, 6, 3″; dem entsprachen die Quecksilberdrucke von 42, 56, 112″. Er drückt das Gesetz in Proportion aus: $p : p' = v' : v$. Es ist nicht denkbar, daß Mariotte das Boylesche Buch nicht gekannt habe. Das Gesetz fand vielfach Widerspruch; schon Jakob Bernoulli erklärte, es sei nur in einem gewissen Bereich gültig, denn wenn die Moleküle der Luft sich vollständig berührten, sei keine weitere Kompression mehr möglich (De gravitate aetheris, Amsterdam 1683, p. 96).

Daß die elastische Eigenschaft nicht nur der Luft, sondern auch allgemein den Gasen eigentümlich ist, hat schon Guericke erkannt. Der Name Gas ist zuerst gebraucht von J. B. van Helmont (1577—1644) in seiner Arbeit De flatibus (Opera omn., Frankfurt 1707, p. 599); er unterscheidet schon mehrere Gasarten, z. B. Gas sylvestre = Kohlensäure, welches sein Entdecker Paracelsus Spiritus sylvestris genannt hatte. Guericke machte das Experiment, daß eine in einen Rezipienten eingeschlossene Flamme Luft verzehrt und bald auslöscht, so muß das Verbrennen darin bestehen, daß der verbrennende Körper aus der Luft einen Bestandteil fortnimmt (Nov. exper., p. 90). Boyle ging noch weiter, indem er

zeigte, daß ein Stück Blei in einer geschlossenen Kapsel bzw. Glasröhre beim Verkalken (d. h. bei der Oxydation) einen Bestandteil der Luft aufgenommen habe; das Stück Blei wog vorher eine Unze, nachher 1 Unze und 6 Gran.

In der Folge wurden nun auch die Gase in bezug auf das Boylesche Gesetz untersucht; hierauf und auf Verbesserungen bzw. Abänderungen der Pumpe und des Manometers beziehen sich innerhalb der nächsten etwa 100 Jahre die Versuche. Von diesen mag noch erwähnt werden das Manometer von Varignon (1654—1722; Mém. de l'ac. Paris 1705), welches in etwa ein Vorläufer des Mac Leodschen Manometers ist und erheblich genauere Ablesungen gestattet als die früheren durch Einfügung eines Schlangenrohrs. Daneben stritt man sich über die Grenzen des Boyleschen Gesetzes und über die Grenze der möglichen Verdünnung in einem Rezipienten. Mariotte selbst glaubte, daß die Grenze der Verdünnung der 4000. Teil der Dichtigkeit sei. Amontons war der erste, welcher erklärte, es gebe keine Grenzen (Mém. d. l'acad. Paris 1702).

Dagegen machte er auf den entscheidenden Einfluß der Temperatur aufmerksam; das Mariottesche Gesetz gelte nur bei gleicher Temperatur. Man müsse also das Gesetz so aussprechen: 1. Die Luftmassen, welche unter gleichem Druck stehen, erhalten bei gleicher Vermehrung der Wärme gleiche Vermehrung der Elastizität. 2. Je stärker eine Luftmasse bei gleicher Temperatur zusammengedrückt wird, um so größer wird ihre Elastizität (100 Jahre vor Gay-Lussac!). Diese Versuche wurden weitergeführt von Sulzer (Mém. de l'acad. Berlin 1753, p. 123). Doch sind seine Versuchsanordnungen fehlerhaft, da er nicht mit trockener Luft arbeitet. Sauberer arbeitet Lambert (1728—1777) und findet den mittleren Ausdehnungskoeffizienten = 0,00375. Dieselbe Zahl, welche Gay-Lussac bei seinen ersten Versuchen fand (Pyrometrie, Berlin 1779).

In derselben Publikation bestätigt Lambert auch Versuche, welche zuerst von Cullen (1710—1796) in der Arbeit: On the cold producet by evaporating fluids and of some other means of producing cold (Essays and observations, physical and literary of a Soc. at Edinburgh II, 1755) gemacht sind, daß nämlich beim schnellen Auspumpen einer Glocke das darin eingeschlossene Thermometer eine Temperaturabnahme von 2—3^0 anzeige. Auch der inverse Versuch ist schon von Lambert gemacht. Beide kombinierte Gay-Lussac, indem er zwei Ballons gleicher Größe durch eine Röhre mit Hahn verband, die eine war evakuiert, die andere mit

einer Gasart gefüllt. Wurde der Hahn geöffnet, so sank die Temperatur in dem vollen Ballon nahezu um ebensoviel als seine Leere stieg (Gehlens Journ. VI, p. 392, 1808).

Die Weiterentwicklung dieser Ergebnisse gehört in die mechanische Wärmetheorie (s. unten).

Um die Gültigkeit des Boyleschen Gesetzes zu prüfen, sind verschiedene Kompressionspumpen konstruïert. Da dieselben nur in technischer Ausführung, aber nicht im Prinzip verschieden sind von den geschilderten, darf ich sie hier übergehen. Nur auf die Methode von Thilorier (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. II, 60, 1835) sei hingewiesen. Er schloß in einem heberförmig flach gebogenen, dickwandigen Glasrohr die Substanzen ein, welche er zur Kohlensäureentwicklung gebrauchen wollte. Das Gas wurde dann in dem geringen Raume einem außerordentlich hohen Drucke ausgesetzt und wurde flüssig. Mit diesem Prinzip erzeugte er große Mengen flüssiger Kohlensäure.

Die Arbeiten mit hohen Druckkräften zur Kompression der Gase forderten besondere Manometer; das offene Quecksilbermanometer kommt nur bei Drucken bis zu höchstens 2 Atm. in Frage; das geschlossene, welches theoretisch, besonders wenn es mit Stickstoff gefüllt ist, für alle Drucke ausreichen würde, wird bei höheren Drucken sehr unempfindlich. Da ist eine neue Idee in dem Regnaultschen Manometer (Mém. de l'acad. Paris 26, p. 580; Pogg. Ann. 143, p. 397, 1871) durchgeführt. Das Gas, dessen Druck gemessen werden soll, wird in einen Raum V abgesperrt; dieser wird mit dem Quecksilbermanometer in Verbindung gesetzt und dehnt sich so auch über das Volumen W aus, so daß sein Druck nun im Verhältnis $V/(V+W)$ abgenommen hat. Diesen Druck gibt das Manometer an; da V und W genau gemessen werden können, findet man den ursprünglichen Druck.

Ein anderer Gedanke ist der des Differentialmanometers, das zuerst von Kretz in seinem Präzisionsmanometer (Course de phys. de M. Jamin, Ed. 3, T. 1) und nahezu gleichzeitig von Achard (Pogg. Ann. 156, p. 417, 1875) ausgeführt ist. Zwei gleich große zylindrische Behälter sind durch kommunizierende U-Röhren verbunden; in den ersten Zylinder wird das zu untersuchende Gas geleitet, drückt auf Alkohollösung, die bis in den anderen Schenkel reicht und dort auf Terpentinöl drückt. Eventuell werden in einer Reihe von Heberröhren alternierend Quecksilber und Wasser angewendet und so bei n Röhren und dem Verhältnis der spezifischen Gewichte $= a$ der Wert eines Skalenteils beim letzten offenen

Schenkel im Verhältnis $1/2[n-(n-1)\,a]$ verkleinert. Endlich ist auch für Quecksilbermanometer das Prinzip der Kompressionspumpe angewandt von Desgoffe (s. Cailletet, C. R. 70, p. 1131, 1870), wo das Gas auf einen kleinen Kolben drückt, an dessen unterem Ende eine breite Fläche angebracht ist, die auf Wasser durch eine Blase drückt und das Wasser drückt dann Quecksilber in die offene Röhre; durch das Verhältnis der Kolbenoberfläche zur Druckfläche hat man es in der Hand, jede Druckhöhe messen zu können. Für technische Zwecke werden wesentlich Metallmanometer benutzt, die sich prinzipiell nicht von den Metallbarometern unterscheiden (s. oben).

Das Townleysche Gesetz hat auch Anwendung zur Volumenbestimmung für solche Körper gefunden, deren spezifisches Gewicht nicht durch Wiegen in Wasser bestimmt werden darf. Der erste Apparat dieser Art ist das Stereometer (jetzt Volumenometer genannt) von Say (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 1, 23, p. 1, 1797). Eine oben durch eine Glasplatte luftdicht abschließbare Glasglocke ist unten mit einem zylindrischen Glasrohr mit Skala verbunden. Dies Rohr wird in ein weiteres mit Quecksilber gefülltes Standglas getaucht, dann der Deckel der Glasglocke geschlossen und nun die Glocke aus dem Quecksilber herausgezogen. Durch zweimalige Ausführung dieses Versuchs mit Ablesung der Steighöhe des Quecksilbers in der Röhre bestimmt man das Volumen der Glocke. Wird in dieselbe dann ein Körper eingelegt mit dem unbekannten Volumen X, so liefert ein dritter Versuch dies X. Kopp (Liebigs Ann. 35, p. 17, 1840) verlegt die Beweglichkeit von der Glasglocke auf die Quecksilbersäule, welche durch Verbindung mit einer Pumpe gehoben oder gesenkt werden kann. Regnault (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 14, p. 207, 1845) verändert das Quecksilberniveau dadurch, daß er dasselbe durch Öffnung eines Hahnes aus der Röhre und einer damit kommunizierenden, oben offenen Röhre auslaufen läßt.

Diffusion der Gase.

Die erste Beobachtung der Diffusion hat Volta (1745—1827) in Brugnatellis Ann. d. chim. 1790 veröffentlicht; er hält über einem Reagenzglas mit Luft ein umgekehrtes mit Wasserstoff. Die beiden Gase diffundieren miteinander in kürzester Frist, denn jedes Glas explodiert bei Annäherung an eine Flamme. Messende Versuche stellte Dalton (1766—1844) zuerst an (Manchester Phil. Soc. Memoirs 5, II, p. 535, 1802). Bringt man eine Anzahl Gase von

den Druckkräften $p_1, p_2, p_3 \ldots$ und alle von gleichem Volumen V, in ein und dasselbe Volumen V, so ist der Druck in diesem $= p_1 + p_2 + p_3 + \ldots$ Vorausgesetzt ist, daß sich die Gase bei der Beobachtungstemperatur nicht verbinden. Gay-Lussac dehnte diese Versuche auf Dämpfe aus (Biot. Traité d. Phys. 1816, I) mit dem Resultat, daß, wenn der Dampf unterhalb des Sättigungszustandes ist, er sich wie trockenes Gas verhält, und die Dampfmenge, welche in einem Gasvolumen in luftförmigem Zustand verharren kann, ist immer genau so groß, als sie bei der gleichen Temperatur im leeren Raume wäre.

Die in den nächsten Jahrzehnten angestellten Versuche haben das Daltonsche Gesetz stets bestätigt. Nur wenn höhere Druckkräfte wirkten, zeigten sich Abweichungen. Bis 2 Atm. Druck fand Regnault sogar für Kohlensäure noch Übereinstimmung. Bei Daltons Versuchen hatten die Gase direkte Berührung.

Mitchell hatte die Erfindung gemacht, Kautschukflaschen zu Ballons aufzublasen. Er füllte dieselben mit H, dann stiegen diese bis zur Decke des Zimmers auf, um nach einigen Tagen wieder herunterzusinken. Das erklärte er sich durch eine Diffusion des H durch die Kautschukhaut und fand, als er eine U-förmige Röhre, deren kurzer Schenkel in ein Gefäß auslief, welches durch eine Kautschukhaut geschlossen werden konnte, daß, nachdem man in die Röhre Quecksilber geschüttet hatte, in kurzer Zeit, wenn das Gefäß in einen Raum mit H oder einem anderen Gase gebracht wurde, durch die Kautschukhaut so viel Gas diffundierte, daß in der langen offenen Röhre ein Überdruck bis zu 33″ entstand, wenn H in dem Raume war (Journ. of the Roy. Inst. IV, p. 101 und V, p. 307, 1829).

Graham untersuchte die Diffusion, wenn die Gase durch eine poröse Tonwand getrennt waren (Pogg. Ann. 28, p. 331, 1833). Dabei stellte sich heraus, daß, wenn auch beide Gase gleichen Druck hatten, die Gase durch die Scheidewand mit verschiedener Geschwindigkeit drangen, so daß die ausgetauschten Gasmengen nahezu im umgekehrten Verhältnis der Quadratwurzeln aus den Dichtigkeiten stehen. Das führte Graham auf die Vorstellung, daß diese Diffusion durch Diaphragmen mit der Ausflußgeschwindigkeit von Gasen aus Kapillaren identisch sind. Daß das nicht richtig ist, wird unten gezeigt. Zunächst war die Konsequenz der Grahamschen Versuche, daß man freie Diffusion von der durch Scheidewände unterscheiden mußte. Die freie Diffusion ist von Loschmidt (1821—1895) eingehend untersucht, wobei er einen Diffusions-

koeffizienten einführt, der nahezu proportional ist der Quadratwurzel aus dem Produkt der spezifischen Gewichte der beiden Gase, welche diffundieren (Sitz.-Ber. d. Wien. Akad. 61, p. 367; 62, p. 468, 1870). Stefan hat die Formeln für drei Gase aufgestellt (ib. 63, p. 63, 1871) und Merget hat diese Gesetze auch auf Dämpfe ausgedehnt (Ann. d. Chim. et de Phys., Ser. 4, 25, p. 121, 1872). Abschließende Untersuchung der freien Diffusion lieferten Obermayer (Sitz.-Ber. d. Wien. Akad. 85, p. 147, 1882, und 87, p. 188, 1883) und Winkelmann (Wied. Ann. 22, p. 1, 151, 203, 1884).

Über den Ausfluß der Luft hatte schon Torricelli in der 7. Abhandlung seiner Lezioni Academiche, die erst 1715 in Florenz gedruckt wurden, gehandelt und die Gleichheit mit den Gesetzen des Ausflusses von tropfbaren Flüssigkeiten erkannt. Jedoch gilt diese Gleichheit nur für mäßige Druckkräfte. Strömt also das Gas gegen den leeren Raum aus, so muß die Ausflußgeschwindigkeit der Quadratwurzel aus seiner Dichte umgekehrt proportional sein. Ist ein Überdruck p_1 gegen einen äußeren Druck p_2 vorhanden, so ist die Ausflußgeschwindigkeit proportional der Quadratwurzel aus $(p_1 - p_2)/p_1$.

Die Prüfung durch d'Aubuisson (Ann. de Chim. et de Phys. 32, 1798), Schmidt (Gilb. Ann. 66, 1820) und Koch (Versuche u. Beob. über die Geschwindigk. usw., Göttingen 1824) gab sehr verschiedene Werte, die von der Größe der Öffnung und der Form der Ansatzröhre wesentlich abhängig waren. Den Einfluß der Ansatzröhren untersuchte Girard (Mém. de l'Inst. de France, T. 5; Ann. de Chim. et de Phys. 16, p. 59) und gibt das Resultat, daß die Ausflußmengen sich wie die Drucke und umgekehrt wie die Quadrate der Röhrenlängen verhalten. Die gleiche Methode benutzte Saint-Venant (C. R. 17, p. 1140, 1843). Besonders die Untersuchungen Bunsens (Gasometrische Methoden, Braunschweig 1857, p. 128 ff.) haben gezeigt, daß das obige Gesetz des Ausströmens nur für Öffnungen in dünnen Wänden gilt. Dann aber gibt es die Möglichkeit, nach Bunsen auf diese Weise bequem die Dichte eines Gases zu bestimmen, da die Dichtigkeiten der Gase bei gleichem Volumen und gleichen Drucken sich wie die Quadrate der Ausflußzeiten verhalten. Darauf gründete sich Bunsens Methode. Er konstruierte auch (ib.) das Diffusiometer. Etwas abgeändert ist seine Methode von Soret (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 4, 13, p. 257, 1868), angewandt zur Dichtebestimmung von Ozon. Diese Erscheinungen nannte Graham Effusion. Davon wesentlich verschieden sind die Ausströmungen

durch dicke poröse Platten und enge Kapillare, welche Graham in einer ganzen Reihe von Arbeiten untersuchte (Phil. Trans. 1846, 1849 usw. bis 1863) und dabei fand, daß die innere Reibung der Gase die veränderten Erscheinungen bedingt.

Diese innere Reibung ist dann von O. E. Meyer (Pogg. Ann. 125, p. 177—401—564, 1865, und 127, p. 253 u. 353, 1866, und 143, p. 26, 1871, und 148, p. 1, 203, 526, 1873) zuerst genau untersucht und festgestellt, daß die Reibungskonstanten der Gase von der Dichtigkeit unabhängig sind, dagegen abhängig von der Temperatur. Neben den Meyerschen Versuchen sind, in den Resultaten übereinstimmend, die von Cl. Maxwell (1831—1879; Phil. Trans. 1866, p. 249; Phil. Mag., Ser. 4, 19, 32 u. 35) als besonders sorgfältige zu nennen. Der weitere Verfolg der inneren Reibung findet sich bei der Wärmetheorie.

Ausgehend von der Beobachtung Döbereiners (Pogg. Ann. 8, p. 127, 1826), daß H durch ein gesprungenes Glas gegen höheren äußeren Druck diffundiert, zeigte Magnus (ib. 10, p. 153, 1827), daß dabei eine gegenseitige Diffusion der Luft und des H stattfindet ganz unabhängig vom Druck. Sind Luft und H durch ein Graphitblatt getrennt, so geht für jedes Volumen *a* der Luft, die zum H wandert, 3,8 a Volumina H zur Luftseite. Es ergibt sich, daß jedes Gas für poröse Scheidewände besondere Geschwindigkeiten der Diffusion hat. Daraus folgt die Möglichkeit, Gasgemische durch Diffusion zu trennen, die sogenannte Atmolyse von Th. Graham (Pogg. Ann. 120, p. 422, 1863). Die Beobachtung Dufours, daß bei der Diffusion eines Gases durch eine poröse Wand die Eintrittsstelle eine Temperaturerhöhung, die Austrittsstelle eine Erniedrigung erfährt, fand ihr Gegenstück in der Feddersenschen Entdeckung der Thermodiffusion (Pogg. Ann. 148, p. 302, 1873), wo zwei verschieden temperierte Räume desselben Gases mit poröser Scheidewand eine Diffusion von der kalten zur warmen Seite zeigen. — Der bekannte Demonstrationsversuch, Leuchtgas durch Tonzylinder in einen Luftraum diffundieren zu lassen, rührt von Jamin her (C. R. 43, p. 234, 1856). Eine ebenso drastisch wirkende Versuchsanordnung mit H in Luft von Sainte-Claire Deville (ib. 52 p. 524, 1861).

Absorption.

Die Absorption der Gase durch feste und flüssige Körper ist schon recht früh untersucht. Mariotte hat in seinem Essai sur la nature de l'air (1676) schon festgestellt, daß das Wasser stets eine

gewisse Menge Luft enthalten. Nachdem die Luftzusammensetzung gefunden war hat Priestley alsbald Versuche unternommen festzustellen, bis zu welchem Grade das Wasser mit Luft, mit O, N und CO_2 geschwängert werden könne (Directions for impregnating water with fixed air London 1772). Schon vorher hatte Bergmann (Abhandl. d. Schwed. Akad. 35, p. 176) künstlichen Sauerbrunnen hergestellt. Jedoch waren diese Versuche ziemlich roh, wirkliche Messungen lieferte erst Henry (1774—1836; Phil. Trans. 1803, I, p. 29) mit dem Resultat: In der Lösung eines Gases, welche sich bei einer gegebenen Temperatur im Gleichgewicht befindet, besteht ein konstantes Verhältnis zwischen dem Druck des gelösten und dem des äußeren Gases. Dies konstante Verhältnis nennt er Absorptionskoeffizient. Dieser ist für die verschiedenen Flüssigkeiten schon nach den Untersuchungen von Saussure (Encyclopädia britannica 49 u. 50, 1872) sehr verschieden. Erst Bunsen (1812—1889) hat genaue Versuche angestellt in „Gasometrische Methoden", Braunschweig 1857, mit seinem Absorptiometer. Bezeichnet p und v Druck und Volumen des Gases vor der Absorption, p' und v' nach der Absorption und w das Volumen der Flüssigkeit, so ist k, der Absorptionskoeffizient, $= (p\,v - p'\,v')/p'\,w$. Der Einfluß der Temperatur ist aber sehr groß, und zwar wird k abnehmen bei steigender Temperatur; nur H scheint eine Ausnahme zu machen. Bunsen beobachtete zwischen 0^0 und 25^0 und bei geringen Druckänderungen. Durch die Versuche von Roscoë und Dittmar (Chem. Soc. quart. Journ. 12, p. 128, 1860) und von Sims (ib. 14, p. 1, 1862) zeigte sich, daß für sehr lösliche Gase die absorbierte Menge nicht dem Druck proportional ist. Durch spätere Messungen von De Khanikoff und Louguinine (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 4, 11, p. 412, 1867) und Wroblensky (Wied. Ann. 17, p. 103, 1882, und 18, p. 290, 1883) hat sich ergeben, daß das Henrysche Gesetz nur für schwer lösliche Gase bei geringen Drucken gültig ist. Für Gasgemische hat Dalton (Manch. Phil. Soc. Mem. 5, p. 535, 1802) bereits festgestellt, daß sich von jedem Gas so viel löst, als ob es allein mit der Flüssigkeit in Berührung wäre. Da verschiedene Flüssigkeiten sich gegen die Gase sehr verschieden verhalten, konnte Berthelot (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 51, p. 59, 1857) Methoden angeben, um Zusammensetzungen von Gasen zu analysieren.

Daß beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand ein großer Teil des gelösten Gases abgesondert wird, war für Eis schon von Wilke festgestellt (Abhandl. d. Schwed. Akad. 31, p. 67, 1779),

für geschmolzenes Silber ist es von Lucas (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 2, 12, p. 402, 1819) nachgewiesen. Aber auch die festen Körper haben solche Gasabsorption, die von Saussure (1767—1845; Gilberts Ann. 47, p. 113, 1814; Naturf. Ges. Genf, 16. Apr. 1812) für verschiedene Gase an Kohle und Meerschaum untersucht ist. Dabei machte Saussure die wichtige Entdeckung, daß bei der Kondensation an Kohle eine erhebliche Temperatursteigerung eintrat, verschieden für die verschiedenen Gase, am stärksten bei Ammoniak. Es ist also nicht erst Dufour der Entdecker, wie gewöhnlich angegeben wird. Daß dabei eine „Kondensation" an der Oberfläche der festen Körper stattfindet, zeigte Moser (Pogg. Ann. 56, p. 204 u. 569; 57, p. 320, 1842) an den nach ihm benannten Bildern; seine verfehlte Erklärung wurde berichtigt durch Waidele (ib. 59, p. 255, 1843). Die Untersuchung der „Gasatmosphäre" an der Oberfläche fester Körper ist von Quincke (ib. 108, p. 326, 1859) durchgeführt. Besonders interessiert die Frage bei Glasoberflächen, da sie hier für zahlreiche Versuche verhängnisvoll sein kann. Magnus (ib. 121, p. 174, 1864) hat dies untersucht und geringen Einfluß gefunden, erheblich mehr fand Chappuis (Wied. Ann. 8, p. 1 u. 671, 1879, und 12, p. 16, 1881). Eine längere Diskussion zwischen Kaiser und Bunsen erstreckt sich auf die Bände 20—29 von Wied. Ann. 1883—1886 über die Absorption und Kondensation der Gase und Dämpfe auf der Glasoberfläche, wobei die unverdampfbare „Wasserhaut" als wesentliche Trägerin der absorbierten Gase nachgewiesen wurde. Daß diese Wasserhaut wesentlich bei alkalihaltigen Gläsern entsteht, zeigten Warburg und Ihmori (ib. 27, p. 481, 1886).

Das eigenartige Verhalten des H zu Pt und Ag entdeckte J. Ritter bereits (Allg. Journ. f. Chem. III, p. 696, 1804). Das durch die Gasaufnahme „schwammig" gewordene Silber wurde durch Erhitzen wieder in den natürlichen Zustand zurückgeführt. An Platin beobachtete es zuerst Erman (Abhandl. d. Berl. Akad. 1818/19, p. 270), und zwar, daß Platindraht von etwa 40° R im Knallgasstrom glühend wird und sich dauernd glühend erhält, solange das Gas ihm zugeführt wird. Dies Experiment ist verschiedentlich nacherfunden. Döbereiner erkannte, daß die Oberflächenvergrößerung für die Intensität der Wirkung ausschlaggebend sei und nahm Platinschwamm (durch Glühen von Platinsalmiak gewonnen) zur Herstellung seines Schnellfeuerzeuges (Über eine neu entdeckte ... Eigenschaft des Platins, Jena 1823). Wöhler (1794 bis 1886) untersuchte zuerst Palladium in dieser Richtung (Pogg. Ann. 3,

p. 71, 1825). Für diese Erscheinungen hat Graham zuerst den Namen Okklusion eingeführt (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 4, 14, p. 315, 1868), während Troost und Hautefeuille (ib. Ser. 5, 2, p. 273, und 7, p. 155, 1874—1876) eine chemische Verbindung Pd_2H entstehen lassen und ähnliche Hydrüre auch für Kalium und Natrium darstellen wollen. In der Dissertation Berliners (Wied. Ann. 35, p. 791, 1888) ist dann nachgewiesen, daß die von Dulong und Thenard (Gilb. Ann. 76, p. 1, 1824) entdeckte katalytische Wirkung der Metalle auf Knallgas durch den okkludierten H bewirkt wird. Zusammenfassende Messungen über die Okklusion des H durch verschiedene Metalle lieferten Neumann und Streintz (Wied. Ann. 46, p. 431, 1892).

Der atomistische Aufbau der Materie.

Es kann natürlich nicht meine Aufgabe sein, die philosophischen Spekulationen über Atomistik hier auseinanderzusetzen, sondern nur die Entwicklung der physikalischen Erkenntnis, wie sie bis zur modernen Lehre von den Atomen vorgedrungen ist. Ich übergehe daher auch die Demokritischen Fragmente. Auf die Atomistik des Anaxagoras ist oben hingewiesen, soweit wir aus den spärlichen Nachrichten darüber urteilen können. Mehr wissen wir von Platon, der freilich Demokrits Anschauung ablehnt, aber selbst eine brauchbare Hypothese aufstellt. Die vier Elemente der Welt sind nicht die letzten Einheiten, sie bestehen selbst aus kleinen Teilen und diese kleinen Teile sind auch wieder aufgebaut aus charakteristischen Einheiten (Tim. 56, B u. C), die so klein sind, daß weder sie selbst noch auch die aus ihnen bestehenden Teile der Elemente sinnlich wahrnehmbar sind. In der Natur gibt es keinen größeren leeren Räume, weil die Luft bzw. das Feuer durch den aus der Bewegung entstehenden Druck etwa sich bildende leere Räume, die Poren, sofort ausfüllt. Trotzdem können wohl in den Körpern kleine leere Räume zeitweilig entstehen. Auflösung und Schmelzung erklären sich durch solche Korpuskeln.

Diesem vernünftigen Anfang einer physikalischen Weltanschauung trat Aristoteles mit der Annahme eines Kontinuums entgegen. Aber Platons Idee blieb nicht unwirksam. Die Alleinherrschaft des Aristoteles beginnt erst 300 Jahre nach seinem Tode! Straton hat die Platonische Anschauung noch weiter gebildet und Heron hat dieselbe in seiner Pneumatik zugrunde gelegt (Opera I, p. 4 ff). Er nennt die kleinen Teilchen *σώματα*. Diese lassen zwischen sich

leere Räume und sind nicht nur bei den festen und flüssigen Körpern, sondern auch für Luft und Feuer die Bausteine. Darum kann man die Luft komprimieren und darum können die Körper durch Erwärmung ausgedehnt werden und verschiedene Aggregatzustände annehmen (ib., p. 11).

Nach dem oben auseinandergesetzten Verhältnis der Physiker am Ausgang des 16. Jahrhunderts ist es kein Wunder, daß gerade sie wieder an Heron anknüpfen. Galilei ist freilich nicht über Heron hinausgekommen. Dagegen finde ich bei Lubin (1565 bis 1631) erheblichen Fortschritt. — Die verschwommenen Äußerungen Brunos über seine atomistische Mathematik übergehe ich. — Lubins langatmige Spekulationen über das mathematisch Unendliche haben hier kein Interesse, dagegen seine Arbeit vom Aufbau der Materie. Der einfache Körper hat keine Teile, er ist das Atom; zwei solcher Atome vereinigen sich zu einem Korpusculum; auch diese sind sinnlich unwahrnehmbar; sie können sich mit anderen vereinen zu Korpuskeln zweiter Art und so fort. Daraus bauen sich die sichtbaren Körper auf, so daß ein kleinstes, sinnlich wahrnehmbares Teilchen eines Körpers schon tausend und mehr Atome enthalten kann (Phosphorus, de prima causa et natura mali etc., 1596; 2. Aufl. 1601, p. 171). Ganz ähnlich ist die Theorie Bassos (Phil. natur. lib. 12, 1621), der gegen Aristoteles an Platon und Anaxagoras anknüpft: Alle Dinge bestehen aus äußerst kleinen, untereinander verschiedenartigen, aber für sich ganz unveränderlichen Atomen (ib. I, p. 10). Diese Atome können sowohl nach Anzahl wie Anordnung auf sehr verschiedene Weisen zu particulae zusammentreten, die auch noch unsichtbar sind, aber durch ihre Zusammensetzung und ihre Eigenschaften das Wesen des Körpers bestimmen. Hier scheint mir zum ersten Male der gesunde Gedanke ausgesprochen zu sein, daß die Körper keine anderen Eigenschaften haben können als die der Moleküle, aus welchen sie bestehen (ib. II, p. 70). Weniger glücklich ist Basso mit der Einführung des Spiritus, der die zwischen den Körpern und den Partikeln vorhandenen Räume ausfüllt und der als ein Kontinuum vorgestellt wird, körperlich, aber doch nicht schwer, nicht zerlegbar, aber nicht in den Körperteilen, sondern nur zwischen denselben.

Es ist kein Zweifel, daß Huygens die Arbeit Bassos kannte; denn sie hatte in Paris großen Anklang gefunden und wurde dort in Verbindung zur Cartesischen Wirbeltheorie gesetzt. Aber Huygens hat nur Anregung dadurch gefunden, er geht weit über Basso hinaus. Für die chemischen Wirkungen und die Aggregat-

zustände stellt er nichts Neues auf, aber die Gravitation und das Licht zieht er zuerst in die Atomistik ein. Um das zu können, dehnt er die Annahme von Atomen auch auf den Äther aus und kommt da zu der Undulationstheorie der Atome des Äthers als Wesen des Lichtes (s. unten). Für die Gravitation aber versucht er, durch Rotationsbewegungen der Ätheratome und dadurch erzeugten Druck eine Erklärung zu finden (De gravitate, Oper. rel. I, p. 95ff.). Das wesentliche ist, daß Huygens jede actio in distantia beseitigen und alles aus Bewegung erklären will.

Sehr tief ist der Unterschied der Atomistik Boyles von dem seiner Vorgänger. Er verlangt die Einheit der Materie für die Atome, während bei Huygens die Atome der verschiedenen Substanzen materiell verschieden waren. Die Atome haben also alle die gleiche Materie und sind alle hart (elastisch). Da uns die Erfahrung lehrt, daß aber alle Körper verschieden sind, so müssen die aus den Atomen bestehenden kleinsten Teile der Körper verschieden sein. Das können sie, wenn die Atome sich voneinander durch Größe, Gestalt und Bewegung unterscheiden. Die Atome können sich so zusammenfassen zu Korpuskeln, daß nur gleichartige zusammen kommen oder auch verschiedenartige, aber auch dadurch können sich die Korpuskeln unterscheiden, daß die Anordnung der Atome verschieden ist und endlich dadurch, daß die Bewegung der Atome voneinander abweicht (Origo formar. et qualit. etc., 1688, p. 42ff.). Boyle ist also der erste, welcher den Atomen ursprüngliche Bewegungen zuweist. Daß nicht nur Atome solche scheinbar willkürlichen Bewegungen ausführen, sondern auch die aus ihnen gebildeten Partikeln, zeigte Leeuwenhoek (1632—1723) in seinen selbstgebauten Mikroskopen der erstaunten Mitwelt (Phil. Trans. 1673; Opera 1724, I, p. 13ff.). Natürlich wurde die Erscheinung nicht richtig verstanden, man dachte teils an kleine Lebewesen, teils an Temperaturströmungen oder Lichtwirkungen in der Flüssigkeit (Wasser) und so war diese Beobachtung wirkungslos.

Eine einschneidende Bedeutung hätte, wenn sie mehr beachtet wäre, die Hypothese Daniel Bernoullis (Hydrodyn., 1738) haben müssen, daß nämlich die Gasmoleküle vollständig unabhängig voneinander, in fortwährender geradliniger Bewegung sich befinden, aufeinander und an die Begrenzung stoßen und sich dabei wie elastische Kugeln verhalten. Auch Euler schloß sich dieser Auffassung an, aber die Zeitgenossen werteten sie nicht. Man hat gemeint, die damals sehr verbreitete Ansicht vom Wärmestoff (s. unten)

habe den Fortschritt wesentlich gehindert und noch mehr die Phlogistontheorie. Allein man behandelte den Phlogiston doch ganz wie ein chemisches Element. Immerhin ist für etwa 60 Jahre kein Fortschritt zu verzeichnen.

Erst Daltons Gesetz von den multiplen Proportionen (Mem. Manchest. V, 2, 1802), nachdem Proust (Phil. Trans. 1799) das Gesetz der konstanten Proportionen für bestimmte Fälle ausgesprochen hatte, gründete die Chemie auf die Atomtheorie, welche er selbst in A new system of chemical philosophy (I, 1808, I_2 1810, II 1827) völlig ausbaute, indem er den H mit dem Atomgewicht 1 ansetzte.

Nun hatte Gay-Lussac mit A. von Humboldt festgestellt, daß O und H bei jeder Temperatur in dem Volumenverhältnis 1 : 2 sich zu Wasser verbinden (J. Phys. 60, 1805) und Gay-Lussac hatte 1808 das allgemeine Gesetz gefunden, daß bei Gasreaktionen die Volumina der reagierenden Gase untereinander und mit den Volumina der Reaktionsprodukte in einem einfachen rationalen Verhältnis stehen (Mém. d. l. Soc. d'Arcueil 2, p. 207, 1809). Um dies empirische Gesetz theoretisch zu begründen, stellte Avogadro (1776—1856) die Hypothese auf: In den verschiedenen Gasen ist unter dem gleichen Druck und der gleichen Temperatur in gleichen Volumen die gleiche Anzahl Moleküle enthalten (J. Phys. 73, p. 58, 1811; deutsch: Ostw. Klass. 8). Er spricht dabei den Gedanken aus, daß die Moleküle der Gase nicht die kleinsten Teile sind, sondern selbst noch aus kleinen (in der Regel aus zwei) molécules intégrantes (Atome) bestehen. Diese Hypothese blieb sehr unbeachtet, so daß Ampère drei Jahre später den gleichen Gedanken unabhängig von Avogadro an Berthollet mitteilen konnte (Ann. Chim. Phys. 90, p. 43, 1814); er nennt die Atome da particules intégrantes. Trotzdem blieb die Hypothese fast unbeachtet, dann nannte man sie eine Regel und jetzt ein Gesetz! Obwohl durch das Dulong und Petitsche Gesetz von der Konstanz der Atomwärme 1819 (s. unten) der Atombegriff gut definiert erschien, ist von den verschiedensten Forschern mit den Begriffen Molekül, Atom, Äquivalent höchst willkürlich, oft in ein und derselben Arbeit, umgegangen, bis Cannizzaro in seinem Briefe an De Luca (Nuova Cimento 7, 1858, deutsch Ostw. Klass. 30) akkurate Definitionen gab und zu sauberer Anwendung aufforderte.

Es ist nicht wunderbar, daß mit diesen von Dalton bis Avogadro reichenden Untersuchungen nun auch der alte Boylesche Gedanke wieder auftauchte, daß die Materie eine Einheit sei und

die Atome sich aus einer Einheit aufbauten. Diesen Gedanken sprach W. Prout (1786—1850) in einer anonym erschienenen Arbeit aus, indem er voraussetzte, daß die Atomgewichte der gasförmigen Elemente ganze Vielfache von dem des Wasserstoffs wären. Die Arbeit hat den Titel: On relation between the specific gravities of bodies in their gaseous state and the weights of their atoms, 1815. Prout fügt übrigens schon die Bemerkung an, daß das Grundelement vielleicht nicht H sei, sondern ein Element mit $^1/_2$ oder $^1/_4$ des Atomgewichts des H.

Diese Proutsche Idee ist zunächst ganz unbeachtet geblieben, bei Dumas (Ann. Chim. Phys. 3, 1841) klingt sie wieder an, dann findet sich bei Chaucourtois (C. R. 56, p. 253 u. 479, 1862) der Versuch, alle Elemente in einer Zylinderspirale anzuordnen, wo dann die übereinander liegenden Elemente ähnliche Eigenschaften haben sollten. Doch erst Mendelejeff konnte den Satz aussprechen: Wenn man die Atome nach steigenden Massen ordnet, so findet man wenigstens in erster Annäherung, daß periodisch Atome mit analogen Eigenschaften wiederkehren. Mendelejeff hat lange an der besten Anordnung der Elemente gearbeitet, doch die Hauptfragen bereits in den beiden ersten Veröffentlichungen ganz präzise ausgesprochen (Ztschr. f. Chem. 1869, p. 406, und Ber. Naturf. Moskau 1870, p. 67). Die Entdeckungsgeschichte und Abwehr unberechtigter Prioritätsreklamationen gibt Mendelejeff selbst (Ber. d. Dtsch. chem. Ges. 1880, 2, p. 1796). Er hatte die Genugtuung, daß die bis dahin nicht bekannten Elemente Ga und Ge die von ihm angegebenen Lücken des Systems an richtiger Stelle ausfüllten, und die Schwierigkeiten wegen der gebrochenen Zahlen für die Atomgewichte sind durch die Entdeckung der Isotopen wesentlich behoben.

Nachdem durch Krönig und Clausius der D. Bernoullische Gedanke neu belebt und die kinetische Gastheorie begründet war, bemächtigte sich diese der Avogadroschen Regel. Denn wenn n die Anzahl der Molekeln in der Volumeinheit, m die Masse eines Moleküls, c die Geschwindigkeit, ϑ der Neigungswinkel ist, unter welchem das Molekül die Wand trifft, so ist der Druck nach Bernoulli (Hydrodyn. X, 1738):

$$p = n \cdot m \cdot c^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \vartheta \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{n \cdot m \cdot c^2}{3} \, .$$

Sind die Geschwindigkeiten verschieden, so ist ein mittleres Geschwindigkeitsquadrat zu setzen $= \bar{c}^2$. Ist N die Anzahl der Mo-

lekeln im Volumen v, so ist $n = \frac{N}{v}$; also $p \cdot v = \frac{N \cdot m \cdot \bar{c}^2}{3}$; da $p \cdot v = R\,T$ das sogenannte Boyle-Charlessche Gesetz darstellt, so ist, wenn $p_1 = p_2$, $v_1 = v_2$; $T_1 = T_2$ ist, $N_1 = N_2$. Umgekehrt kann man dies N bzw. n aus gemessenem p, v und T bestimmen; das tat Loschmidt (1821—1895; Sitz.-Ber. Wien 54, 1866).

Übrigens wird in den meisten Büchern, welche sich mit der Avogadroschen Regel beschäftigen, die Sache so dargestellt, als ob Avogadro durch eine derartige Überlegung zu seiner Regel gekommen sei; das ist nicht der Fall. Avogadro stand noch auf der Annahme eines Wärmestoffs und diskutierte die gegenseitige Entfernung der Gasmoleküle und die Verteilung des Wärmestoffs auf der Oberfläche der einzelnen Moleküle. Für die weitere energetische Behandlung verweise ich auf Boltzmanns Vorlesungen über Gastheorie 1910—1912 und die sich anschließende Diskussion.

Es ist verschiedentlich behauptet, daß die Konstante der Zustandsgleichung R zur Ehrung Regnaults so bezeichnet sei. Da bereits Clapeyron die Zustandsgleichung $p\,v = R\,(267 + t)$ schreibt (J. de l'école polyt. 14, p. 170, 1834) kann das nicht richtig sein. Das R stammt aus Newtons Princ. natur. (2. Aufl. 1713, p. 302), wo er den inneren Widerstand in einer Flüssigkeit $R = a \cdot \frac{c}{r}$ setzt, wo c die Geschwindigkeitsdifferenz zweier paralleler Flächenstücke und r ihr Abstand ist; dies a ist dann nach der kinetischen Gastheorie $= \frac{n \cdot m\,c\,l}{3}$, also $R = \frac{n \cdot m \cdot c^2 \cdot l}{3\,r}$, wo l die mittlere Weglänge ist, die in einem ruhenden Gase $= r$ gesetzt werden kann; also wird $R = n \cdot m\,c^2/3$. Da ferner nach Clausius (Pogg. Ann. 79, p. 377, 1850) die Änderung der Geschwindigkeit proportional $\sqrt{T}$ ist, so ist der Druck in Volumen v bei der Temperatur T:

$$p = \frac{n \cdot m \cdot c^2 \cdot T}{3\,v} = \frac{R \cdot T}{v}\,.$$

Dies Newtonsche R hat sich auch dauernd behauptet für alle Flüssigkeitsbewegungen; ich nenne nur Eulers Mechanik (Opera, Ser. II, 1, p. 309) und d'Alembert (Essai d'une nouv. Ther. de la Res. d. Fluids, 1752, p. 207).

Auf dieser Grundlage hat dann die kinetische Gastheorie die Möglichkeit gegeben, die Molekulargrößen zu bestimmen. Doch greift die Ausführung weit über die diesem Buche gesteckte Zeitgrenze hinaus. — Aber noch auf einem anderen Wege konnte man die Bestimmung dieser Größen erhalten und sie führte zu den gleichen

Werten. Diese Untersuchungsmethode geht aus von der regellosen Bewegung kleinster Teilchen in einer Flüssigkeit, wie sie von Leeuwenhoek (s. oben) zuerst beobachtet war. Dieselbe Beobachtung machte Robert Brown (1773—1858), der in einer Arbeit: A brief account of mir. observ. etc. and on the general existence of active molecules in org. and inorg. boddies (Edinb. New. Phil. J. 5, 1828) die regellose, unausgesetzte Bewegung kleinster Teilchen in Wasser nachwies. Er so wenig, wie die sich zunächst damit Beschäftigenden konnten eine Erklärung dafür geben. Auch die ausgedehnte und sorgfältige Untersuchung Chr. Wieners (Pogg. Ann. 118, p. 79, 1863) stellte nur fest, daß die Bewegungen weder von einer in den Teilchen liegenden, noch von einer äußeren Kraft veranlaßt würden. Die in den modernen deutschen Büchern meist angegebene Jahreszahl der Erfindung 1827 rührt von Wiener her. Ramsay brachte auf der Tagung der Brit. Assoc. in Bristol 1881 die Erscheinung zur Sprache und erklärte dieselbe durch die Stöße, welche diese suspendierten, kleinen Teilchen durch die Molekularbewegung erhalten. Er hatte diese Ansicht schon fünf Jahre früher ausgesprochen (Quart. J. Geol. Soc. 32, 1876).

Die gleiche Erklärung suchte Gouy plausibel zu machen (Journ. d. Phys. 7, p. 188, 1888) und Siedentopf behauptete dasselbe (Forsch. d. Röntgenst. 1, 1898), ohne jedoch einen zwingenden Beweis zu geben. Unter Voraussetzung der molekularkinetischen Theorie der Wärme gelang es Einstein, eine Theorie dieser Bewegung auszubilden, welche denn auch einen Weg bahnte, die wahre Größe der Atome zu berechnen (Ann. d. Phys. 17, p. 549, 1905). Das Resultat aller der verschiedenen Wege zur Berechnung der Loschmidtschen Zahl ist eine überraschend gute Übereinstimmung und damit ist eine große Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit der Voraussetzungen gegeben. Eine Zusammenstellung dieser Resultate bietet Perrin (Die Atome, deutsch 1914, p. 189).

Die Wellenbewegung.

Wann sich die Menschen zuerst mit der Wellenbewegung beschäftigt haben, ist völlig unnachweisbar, wo uns zuerst im Gebiet der Physik die Wellenbewegungslehre entgegentritt, ist dieselbe bereits so weit ausgebildet, daß es nicht der Anfang gewesen sein kann. Es ist uns aus dem Altertum weder ein Lehrbuch noch auch nur eine Abhandlung bekannt, die sich mit der Wellenlehre beschäftigte, und auch über das Gebiet der Schallwellen haben wir

kein allgemeines Lehrbuch, sondern nur für musikalische Akustik. Es ist durch die Arbeit von E. Frank (Logos IX, p. 222, 1920) der Nachweis erbracht, daß die das mathematische Denken des griechischen Altertums durchaus beherrschende Proportionslehre bei Pythagoras und seinen Anhängern aus der Musik hervorgegangen ist. Wir wissen nicht nur aus Platons Staat (IV, p. 400), daß Musik obligatorisches Lehrfach der griechischen Schulen war, und zwar ein Hauptfach. Platon, der sich in bezug auf Akustik selbst als Pythagoräer bekennt (Staat, p. 530), hat im Timaios (p. 34) eine Tontabelle hinterlassen. Die schnelle Schwingung erzeugt einen hohen, die langsame einen tiefen Ton, der von dem die Schwingung erregenden Körper durch die Schwingungen der Luft dem Ohre zugeführt und von diesem in das Gehirn befördert wird (p. 67). Die griechische Musik hatte das geschlagene oder gezupfte Saiteninstrument (Lyra und Kithara) und die Flöte in verschiedensten Ausführungen. Die älteste Lyra mit nur fünf Saiten gab als Grenze die Quinte; die Anzahl der Saiten wurde später vermehrt. Von den Schwingungen dieser Saiten geht die Betrachtung aus. Die Intervalle der Tonarten werden in Verhältnissen (z. B. 2 : 1 : $^3/_2$ usw.) angegeben, welche die Schwingungszahlen darstellen und die dann von den Pythagoräern zu Proportionsrechnungen ausgebildet wurden und eine Theorie der Musik lieferten.

Gegen diese theoretische Behandlung der Schallwellen macht Aristoxenos (etwa 320 v. Chr.) die empirische Ableitung geltend (Harmonik, p. 23, Ausg. Marquard). Dabei macht er sich lustig über die kleinen Differenzen, die bei der reinen Proportion für die Intervalle entstehen. Man hat daraus gemacht, daß er Erfinder der temperierten Stimmung sei, das ist er aber durchaus nicht, denn diese setzt gleiche Intervalle für alle aufeinander folgenden Töne einer Oktave voraus. Davon ist aber im Altertum nicht die Rede. Erst Michael Stifel (Arithm. integra, 1544, fol. 79) führt diese temperierte Stimmung durch. Die Griechen gingen vom Tetrachord aus und setzten zwei Tetrachorde zu einer Skala zusammen, z. B. die dorische = *e f g a* | *h c' d' e'*. Da sie keine absolute Tonhöhe festlegten, kann diese Tonweise natürlich von jedem Grundton anfangend in der Folge ganzer Ton, halber Ton, ganzer Ton, halber Ton, ganzer Ton, ganzer Ton gebildet werden. Ein weiteres Eingehen auf die Tonarten gehört in die Musikgeschichte. Für die Physik ist wertvoll die Tatsache, daß die Längenverhältnisse am Monochord festgestellt sind und die Schwingungszahlen im umgekehrten Verhältnis der Längen erkannt sind. Obwohl also

die schwingenden Saiten als Tonerreger für die mathematische Entwicklung bei den Griechen von fundamentaler Bedeutung war, haben wir doch aus der uns erhaltenen Literatur keine Theorie über den Schwingungsvorgang erhalten.

Natürlich haben die Griechen auch die Wasserwellen gekannt und deren Entstehung durch Windstöße erfahrungsmäßig feststellen können, aber auch hier fehlt es an einer wissenschaftlichen Behandlung der Frage. Nur in zwei Fragen beschäftigt sich Aristoteles mit den Wellen (Arist. probl. 41). Er fragt: Weswegen kommen die Wogen zuweilen eher an als der Wind? Aus der Antwort wird nur so viel klar, daß er meint, die Welle sei die unmittelbare Fortpflanzung des Stoßes, welcher die Welle erregte; im übrigen ist die Erklärung physikalisch unverständlich. Erst Nicholson (Journ. of nat. phil. 14, p. 185) und Bremontier (Journ. d. Phys. par de la Métherie 79, p. 77, 1814) kommen 1808 auf die Erscheinung zurück und sagen, die Welle pflanzt sich unabhängig vom Winde fort, es kann also die Erregung durch einen herabsteigenden Luftstrom an ein und demselben Orte verharren, aber die erregte Welle pflanzt sich über das Meer fort, auch wenn die Erregung längst aufgehört hat.

In demselben Abschnitt fragt Aristoteles weiter: Warum ist das Meerwasser durchsichtiger als das trinkbare Wasser? Vielleicht weil es öliger ist? Aufgegossenes Öl macht es noch durchsichtiger. Die Antwort ist wieder gänzlich unbefriedigend. Der unverständige Notizensammler Plinius (Hist. nat. II, c. 106) gibt folgenden Grund an: Es ist die Natur des Öles, daß es Licht herbeiführt (!) und alles, auch das Meer, beruhigt. Diese Kenntnis der wellenglättenden Wirkung des Öles hat sich durch die Jahrhunderte in den Kreisen der Seeleute fortgepflanzt. Erst Franklin beschäftigt sich wissenschaftlich mit der Frage, während frühere Schriftsteller nur Zeugnisse für die Tatsache gesammelt haben.

Franklin hat sich nicht nur beobachtend und Notizen sammelnd, sondern auch experimentell mit dieser Frage beschäftigt (Phil. Trans. 64, II, 1774, p. 455), wobei er auch zuerst die Beobachtung machte, daß ein ölgetränktes, in eine scharfe Spitze auslaufendes Stäbchen Holz, auf Wasser gelegt, durch das auslaufende Öl abgestoßen bzw. gedreht wird. Sein Erklärungsversuch setzt Abstoßung der Ölteilchen gegeneinander, Nichtvorhandensein einer Anziehung zwischen Öl und Wasser voraus. Der Wind gleitet an der Oberfläche ab, kann daher die Welle nicht weiter anregen. Eine große Zahl von Erfahrungen ist von Lelyveld gesammelt (Götting. gelehrt. Anz. Zus. 1777, St. 12, p. 177). Wirklich untersucht ist diese Frage zuerst von

E. Heinrich und Wilh. Weber (Wellenlehre, 1825, p. 78ff.), wo zunächst fettige und ätherische Öle, sowie Wasser und wässerige Lösungen in bezug auf die Ausbreitung der Ölhaut untersucht werden. Bei der versuchten Erklärung kommen die Verfasser zum Schluß auf die Elastizität, ohne jedoch die Oberflächenspannung einzuführen (s. oben).

Die Entstehung der Wasserwellen durch punktförmige Erregung, einfallende Tropfen oder Steine, durch linienförmige Erregung, eingestoßene Bretter, und durch Winddruck waren durch Beobachtung natürlich längst bekannt; aber der erste, welcher sich experimentell damit beschäftigt zu haben scheint, war Newton (Phil. Nat. Princ., 1687, p. 362). Er geht aus von der Fortpflanzung eines Stoßes in einer Flüssigkeit. (Die von ihm dazu gezeichnete Figur [p. 355] wird oft so verstanden, als ob er Wasserwellen beobachtet hätte; das stellt dieselbe aber nicht vor, sondern ist nur eine Zeichnung, um seine theoretische Ansicht von der Fortpflanzung des Stoßes innerhalb einer Flüssigkeit zu veranschaulichen.) Dann macht er das Experiment über die Stoßfortpflanzung in einer Wasserwage und kommt dann in Prop. 46 auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen, wobei er unter Wellenlänge die Distanz zweier Wellenberge oder -täler versteht. Sein Resultat ist nur annähernd richtig, wie er selbst sagt, weil er für das einzelne Wasserteilchen eine rein vertikale Schwingung vorausgesetzt hat, während es in Wirklichkeit in einem Kreise schwingen müsse. 's Gravesande definiert die Wellenlänge ausgehend von dem ursprünglichen Niveau und läßt die Welle aus Berg und Tal bestehen, wobei aber auch das Tal vorangehen kann (Phys. elem. math. III, c. 11). Im übrigen schließt er sich Newton an. Daniel Bernoulli beschäftigt sich in seiner Hydrodynamik 1738, die Ausgangspunkt für die moderne Hydrodynamik geworden ist, vorübergehend auf Grund Taylorscher Vorstellungen mit den Wasserwellen. Euler behandelt nur in einer ganz kurzen Arbeit die durch Wind erregten Wasserwellen und gibt dafür eine Theorie (Act. acad. Petr. 1777/78, I, p. 190), ohne die Sache zu erschöpfen. Nahezu gleichzeitig gab Laplace seine Wellentheorie bekannt (Hist. de l'acad. Paris 1779, p. 542), welche ebensowenig das Problem löst. Lagrange hat sich zweimal mit der Theorie der Wellen beschäftigt (Mém. de l'acad. Berlin 1781 und 1786/88, p. 192). In der zweiten gibt er zu: Il serait peut-être impossible d'établir une théorie générale et rigoureuse sur les ondes, aber er versucht für den Fall, daß die Wellenhöhe unendlich klein und die Tiefe der Wasserschicht hinreichend klein ist, eine angenäherte

Lösung, die unter den gegebenen Beschränkungen sagt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen gleich derjenigen ist, die ein durch die halbe Höhe des Wasserniveaus fallender Körper erhält. — Durch Versuche und theoretische Überlegung kommt Flaugergues (Verh. d. Holl. Maatsch. d. Weet. 29, p. 131, 1793) wenigstens etwas weiter; er unterscheidet den ersten Teil der fortschreitenden Welle von der nachfolgenden Senkung; letztere soll parabolisch, erstere zykloidisch geformt sein. Die Theorie, welche er dazu liefert, muß verkehrt sein, weil sie die Newtonsche Voraussetzung macht, daß sich die Welle wie ein Stoß fortpflanze.

Sehr viel mehr leistet Gerstner in einer schon 1802 in der böhmischen Gesellschaft erschienenen Arbeit (Gilb. Ann. 32, p. 412, 1809), die sich auch theoretisch von allen früheren Versuchen vorteilhaft auszeichnet. Für eine in relativer Ruhe befindliche Wasseroberfläche findet er, wenn die Wellenerhebung gegen die Tiefe des Wassers verschwindet, daß sich die Wellenkurve als Zykloide darstellt, unter der Voraussetzung, daß der hydrostatische Druck auf der ganzen Ausdehnung der gleiche ist. Jedes einzelne Teilchen beschreibt dann einen Schwingungskreis. Man hat dann zu unterscheiden Wellenlänge, Höhe und wirkliche Bewegung der kleinsten Teilchen, die voneinander unabhängig sind. Die einfache Zykloide erfährt durch Bewegung des Wassers, der Luft und andere Ursachen aber Veränderungen, die er „gedrückte“ oder „gedehnte“ Zykloiden nennt. Auch das Überschlagen der Wellen findet seine Erklärung. Aber Gerstner macht die nicht besonders hervorgehobene Hypothese, daß alle Kräfte, die auf verschiedene Punkte der Bahn senkrecht drücken, einander gleich seien. Darum erklärt die Gerstnersche Theorie tatsächlich nur einen speziellen Fall, der in Wirklichkeit immer nur mit geringer Annäherung erreicht werden kann.

Nahezu gleichzeitig erschienen die viel zitierten Arbeiten von Poisson (Mém. de l'acad. Paris 1816, p. 71) und Cauchy (Mém. des savants étrang., T. 1, 1815). Cauchy beschränkt sich allein auf Wasserwellen, wenn die Tiefe des Wassers als unendlich angenommen werden kann. Er findet dabei den Einfluß, welchen die Gestalt des eingetauchten Körpers auf die Anzahl der entstehenden Wellen hat. Im übrigen ist seine Funktion ganz unabhängig von der Anfangsgestalt der Oberfläche. Poisson kommt in § 223 seiner großen Abhandlung auf die Wasserwellen, macht die gleiche Voraussetzung in bezug auf die Tiefe, wie Cauchy, und nimmt an, daß die vertikalen Schwingungen der Moleküle mit der Entfernung vom Erregungspunkt abnehmen, wenn die Oberfläche nach allen

Seiten frei ist und nur ein Punkt als Erreger in Frage kommt, und daß sie der Quadratwurzel aus der Entfernung umgekehrt proportional ist in einem Kanal von gleichmäßiger Breite. Zur Erregung zieht Poisson einen Körper schnell aus dem Wasser, nimmt aber keine Rücksicht auf die mitgezogene Wassersäule. Da erschien das schon zitierte Buch der Gebrüder Weber (s. oben) und behandelte die ganze Wellenlehre zum ersten Male auf Grund ausgedehnter Versuche. Durch die Wellenrinnen beweisen sie, daß die Wassermoleküle Kreisschwingungen ausführen, daß der Wellenberg schmäler ist, als das folgende Wellental, und klären eine große Reihe früherer Beobachtungen auf. Sie erzeugen stehende Wellen neben den fortschreitenden, stellen die Gesetze der Reflexion, der Interferenz, des Einflusses des Bodens, der Inflexion fest und vieles andere, und untersuchen die verschiedenen Theorien auf ihre Fehler, besonders eingehend die Poissons, und die Entstehung von Wirbelbewegungen.

Hatten die Brüder Weber schon auf die Elastizität der Ölschicht hingewiesen und gezeigt, daß wesentlich unter dem Einfluß dieser Haut die kleinen krausen Wellen, von Poisson Zähne genannt, auf den breiten Wogen vernichtet wurden, so zeigte W. Thomson (Phil. Mag. 42, p. 362, 1871) den Einfluß der kapillaren Oberflächenspannung auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wasserwellen, und G. Tait benutzte dies, um die Oberflächenspannung aus stehenden Wasserwellen abzuleiten (Proc. of the R. S. of Edinb. 8, p. 485).

Eine andere Art von Wellen behandelte Faraday (Phil. Trans. 1831 und Pogg. Ann. 26, p. 220, 1832); es sind die kleinen Kräuselungen (crispations), welche in einer dünnen Wasserschicht auf schwingenden Platten entstehen und von ihm durch Luftströmungen, welche von der schwingenden Platte erzeugt würden, erklärt werden, während Kundt (ib. 140, p. 298, 1870) sie durch die stehenden Schwingungen einer Luftplatte erklärt. Die Entstehung solcher Wellen auf Flüssigkeitsoberflächen durch Klangplatten, tönende Glocken, Stimmgabeln und auf Flüssigkeitsstrahlen sind dann eingehend untersucht von Matthiessen (ib. 134, p. 107, 1868, und 141, p. 375, 1870). Lord Rayleigh wandte auf diese Versuche die Thomsonsche Theorie an und fand, daß, wenn λ die Wellenlänge, n die Schwingungszahl ist, $n^{\frac{2}{3}} \cdot \lambda$ konstant ist (Phil. Mag., Ser. 5, 16, p. 50, 1883). Werden auf der Wasserfläche zwei Wellensysteme verschiedener Wellenlängen erzeugt, so bildet die Interferenzfigur kein konstantes Bild, wie bei den Weberschen Inter-

ferenzfiguren, sondern die Interferenzhyperbeln wandern; das hat Lissajous (C. R. 67, 1868) entdeckt und Matthiessen (Wied. Ann. 32, p. 626, 1887) genauer untersucht und theoretisch begründet.

Die Brüder Weber hatten schon beobachtet, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen abnimmt, wenn die Tiefe der Flüssigkeitsschicht geringer wird (l. c., p. 171) und dasselbe teils auf die Reibung, teils auf die Behinderung der Kreis- bzw. Ellipsenschwingung der Moleküle zurückgeführt. Diese Frage ist unter Benutzung der Eulerschen Bewegungsgleichungen ohne die sonst gewöhnlich gemachte Voraussetzung, daß ein Geschwindigkeitspotential bestehe, von Rankine behandelt (Phil. Trans. 1863, I, p. 227) und Webers Resultate sind bestätigt. Gebr. Weber untersuchten auch den Einfluß des Bodens, ob er geneigt ist, ob er rauh ist, ob einzelne Hindernisse vorhanden sind. Ihre Beobachtungen klärten auch manche der an den Meereswogen beobachteten Anomalien auf.

Vom energetischen Standpunkt versuchte v. Helmholtz das hydrodynamische Problem der Meereswogen zu lösen, nachdem er sich aus den Eulerschen Gleichungen einen Weg abgeleitet hatte, um die Bewegungsvorgänge in der Welle zu verfolgen (Wied. Ann. 41, p. 641, 1890, und Sitz.-Ber. d. Berl. Akad. 1889, p. 761), wobei sich ergab, daß es Wellen gibt, die bei genügender Windstärke eine größere Stabilität besitzen als die Strömung bei ebener Grenzfläche. Die Berichtigung einiger Fehler in der Ableitung und die Fortführung der Helmholtzschen Hydrodynamik übernahm dann W. Wien in einer größeren Reihe von Abhandlungen (Wied. Ann. 56, p. 100, 1895; 59, p. 753, 1896; 62, p. 192, 1897). Jedoch ist die Hydrodynamik der Wasserwellen noch nicht zur Lösung aller durch die Erscheinungen gegebenen Fragen durchgedrungen.

Die Seilwellen und schwingenden Saiten.

Der erste, welcher über die Erfahrungen der Griechen in bezug auf das Monochord etwas hinauskam, war wohl Baco von Verulam (1566—1626); freilich untersucht auch er diese Schwingungen wesentlich durch die erregten Töne. Damit stellt er den Einfluß der Spannung, der „Härte“, der Länge und des Querschnitts fest (Sylva sylvarum sive historia naturalis II, p. 782, 1665). Messende Versuche stellt Mersenne an (Harmonicarum, lib. II, 1635); darin u. a. die beiden Sätze: Die Schwingungszahlen von Saiten gleicher Länge und Spannung verhalten sich wie die Quadratwurzeln ihrer

Gewichte, und bei gleicher Länge und gleicher Dicke verhalten sie sich wie die Quadratwurzeln der spannenden Gewichte. Er bemerkt auch, daß eine schwingende Saite außer dem Grundton die Duodezime hören lasse und noch höhere, ohne jedoch den Grund anzugeben. Dies gelingt Sauveur (Mém. Paris 1700, 1701, 1703, 1707 und 1711); er experimentiert mit dem Monochord und aufgesetzten Papierreitern, um den Schwingungszustand zu untersuchen, zeigt, wie man neben dem Grundton Schwingungen von halber, drittel, viertel usw. Wellenlänge erzeugt und nennt die diesen Teilungen entsprechende Töne harmonische Obertöne und findet auch deren Erzeugung durch Resonanz (ohne das Wort zu gebrauchen). Ähnliche Ergebnisse hatte Brook Taylor (1685 bis 1731) und zeigte das Längenverhältnis der Saiten für alle harmonischen Töne (Methodus incrementorum, 1715, p. 86). Taylor bestimmt darin die Schwingungszahl einer Saite von gleichmäßiger Dicke aus der Länge, dem Gewicht und der Spannung. Er nennt die Schwingungskurve eine äußerst gedehnte Zykloide, aber hat zuerst die Elongationen als die Sinus der Längen erkannt, welche die Abszissen sind.

Übrigens muß erwähnt werden, daß damals noch mehrere Physiker nicht davon überzeugt waren, daß der Ton einer Saite von den großen Schwingungen der Saite herrührte, sondern vielmehr von dem durch das Schwingen erzeugten „Erzittern“ der Moleküle. So lehrte Carré (Mém. de l'acad. Paris 1709) und De la Hire (ib. 1716), während Newton die Schwingungen der Saite als direkte Ursache des Tones ansieht (Princ. phil. nat. II, p. 254ff.). In der zweiten Auflage nimmt er Bezug auf die Versuche Sauveurs. Das Problem der schwingenden Saite hatte dann Johann Bernoulli (1667—1747) behandelt und behauptet irrtümlich, die Schwingungskurve sei stets eine verlängerte Zykloide. Mit dem gleichen Gegenstand beschäftigt sich sein Sohn Daniel (1700—1782) in vier Abhandlungen von 1734 (Comm. Petrop., p. 108; Mém. Berlin 1753, p. 147 u. 173) bis 1771 (Nov. Comm. Petrop., p. 62), aber es gelingt ihm nicht, die vollständige Integration der Differentialgleichungen zu finden. Mit der Methode der unbestimmten Funktionen sucht d'Alembert die Schwingung der Saiten zu analysieren (Mém. Berlin 1747, p. 214; 1750, p. 355; 1763, p. 235). Die Lösungsmethode von Lagrange (Misc. Taur. III, p. 242, 1765) schließt sich eng an die D. Bernoullis an.

Eine vollständige Theorie der Seilwellen verdanken wir erst L. Euler. In seinem Tentamen nov. theor. musices, Peters-

burg 1739, wird das Problem nur gestreift, aber in 16 Abhandlungen gibt Euler sowohl eine Theorie der fortschreitenden Wellen in einem Seile, wie auch der stehenden Schwingungen. Die fortschreitende Welle in einem gespannten Seile behandelt er in Nov. Comm. Petrop. 17, p. 381, 1772/73; aber darin ist die Reflexion der Welle fehlerhaft. Das korrigiert er in Acta Acad. Petr. 1779, II, p. 116, 1783, wo er die vollständige Integration gibt, die durch die Experimente der Gebrüder Weber (l. c., p. 465) glänzend bestätigt wurde. Den Schwingungszustand eines durch Gewichte belasteten freischwebenden Seiles untersucht Euler in Acta acad. Petrop. 1781/84, I, p. 157, und kommt da zu dem Resultat, daß die fortschreitende Wellenbewegung sich nach einiger Zeit in eine stehende Schwingung wandelt, auch dies ist von Weber bestätigt. Dies Resultat war schon von Daniel Bernoulli früher gefunden (Comm. acad. Petrop. 13, 1740/50). Euler hat auch die Schwingungszahl des von einer gespannten Saite zu erwartenden Grundtons aus der Dimension zu berechnen gelehrt. Ist das Verhältnis des Durchmessers zur Peripherie der Saite $\frac{\delta}{\pi}$, die Länge l, die Länge des Sekundenpendels λ, das Verhältnis der Spannung der Saite zu ihrem Gewicht $\mu : 1$, so ist die Schwingungszahl $n = \frac{\pi}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \mu}{l}}$ (Tentamen nov. theor. mus., 1739). Das ist identisch mit $\frac{1}{l} \sqrt{\frac{g \cdot P}{q \cdot s}}$, wenn P das spannende Gewicht, q der Querschnitt, s das spezifische Gewicht der Saite ist.

Über die Seil- und Saitenschwingungen ist eine lange und hartnäckige Diskussion zwischen D. Bernoulli und Euler geführt. Euler hatte sich zunächst mit Seilschwingungen beschäftigt, und zwar mit unelastischen, freihängenden Fäden mit verschiedenen Belastungen, war dann auch zu elastischen Körpern übergegangen und hatte die allgemeine Schwingungsgleichung aufgestellt (Comm. acad. Petrop. 7, 1734/35, p. 123, 1740). Er schloß die Behandlung der Seilwellen im folgenden Jahre einstweilen ab (ib. 8, 1736, p. 48, 1741). Dann erst wandte er sich den Saitenschwingungen zu und fand, daß die Lösung der Differentialgleichung $\frac{d^2 y}{dt^2} = a \cdot \frac{d^2 y}{dx^2}$, nämlich $y = f(x + \varkappa t)$, wo t die Zeit ist und $\varkappa$ eine Konstante von der Masse und der Länge der Saite abhängig, eine unendliche Zahl verschiedener Schwingungen zulasse (Nova acta erud. 1749, p. 512, gelesen 1748). Dieser Auffassung hatte sich auch d'Alembert angeschlossen (Hist. de l'acad. Berlin 1747). Demgegenüber

verteidigte Bernoulli die Taylorsche Auffassung und zeigte, daß alle Schwingungszustände einer Saite durch die Gleichung:

$$y = \alpha \sin \frac{\pi x}{a} + \beta \sin \frac{2\pi x}{a} + \gamma \sin \frac{3\pi x}{a} + \ldots .$$

dargestellt werden können, wo a die Länge der Saite ist (Hist. de l'acad. Berlin 1753, p. 157, 1755). In der Antwort (ib., p. 196) erklärt Euler, daß diese Bernoullische Lösung in seiner enthalten sei. D. Bernoulli hat übrigens auch die Schwingungen ungleich dicker Saiten (Nov. Comm. Petrop. 1771) in Betracht gezogen. Euler behandelte die Taylorschen bzw. Bernoullischen Reihen in mehreren Abhandlungen, auf welche hier einzugehen nicht der Ort ist; nur sei erwähnt, daß es Euler auch gelang, eine von Clairaut gefundene Beziehung zum Störungsproblem aufzulösen in zwei Arbeiten aus dem Jahre 1777 (Nova acta Petrop. 11, 1793, p. 94 u. 114, 1798) und die Koeffizienten der Glieder einer trigonometrischen Reihe zu bestimmen. Dieselben Reihen traten dann bei der Behandlung der Wärmeleitung durch Fourier wieder auf (Théorie analytique de la chaleur, Paris 1822, einzelne Abschnitte davon sind der Akademie der Wissenschaften schon 1807 und 1810 vorgelegt). Auf die frühere gleichwertige Lösung der Koeffizientenbestimmung durch Euler hat Lebesque (Leçons sur les séries trigonométriques, Paris 1906, p. 23) hingewiesen, so daß ich auf diese historische Darstellung verweisen kann. Abschließend sind diese Untersuchungen über die Fourierreihe von Dirichlet in Crelles Journ. 4, 1829, und 5, 1830, behandelt. Der erste, welcher für die Schwingungsbewegung die Reibung berücksichtigte, war L. Euler (Acta acad. Petrop. 1780/84, II, p. 164), und er fand bereits die Abnahme der Amplitude in geometrischer Progression. Vollständig ist dieser Einfluß der Reibung erst durch C. F. Gauss untersucht; er bestimmt das Verhältnis zweier aufeinander folgender Schwingungen $q = e^{\alpha \frac{T}{4}}$, wo α die Verzögerung bei der Geschwindigkeit 1 ist, so ist die Differenz der Logarithmen der aufeinander folgenden Amplituden konstant; das nennt Gauss das logarithmische Dekrement (Resultate aus den Beobachtungen des magn. Vereins, 1837, p. 58).

Aus Eulers Ableitungen war für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen die Formel $c = \sqrt{\frac{g \cdot P}{q \cdot s}}$ für die Seilwellen und Saitenschwingungen erhalten, d. h. die Geschwindigkeit mußte unabhängig von der Wellenlänge sein. Daß dies zutrifft, bewiesen

die Gebrüder Weber zuerst durch umfangreiche Versuche (l. c., p. 460 ff.). Da dann auch die Schwingungszahl $n = \frac{c}{2l}$ und die Schwingungsdauer $t = \frac{2l}{c}$, wo l die Länge der Saite ist, aus der Geschwindigkeit bestimmt wird, so gibt diese Formel auch die Möglichkeit, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in elastischen Medien durch Tonhöhebestimmung oder Schwingungsdauer zu messen, worauf Weber ebenfalls aufmerksam macht. Die analogen Versuche für stehende Wellen sind auch von den Brüdern Weber ausgeführt. Weber ist auch der erste, der die Obertöne, er nennt sie Flageolettöne, bei den schwingenden Saiten beobachtet und sie für die Verschiedenheit des Klanges verantwortlich macht. Die Entstehung dieser mitschwingenden Obertöne hängt von der Lage der Erregungsstelle ab. Die weiteren Versuche erstreckten sich wesentlich auf Ausbildung von Methoden zur Herstellung transversaler Schwingungen.

Aus der großen Zahl derselben hebe ich nur hervor, daß Dove wohl der erste war, welcher die stehenden Wellen einer Saite durch den Elektromagneten erzeugte (Pogg. Ann. 87, p. 139, 1852). Das wurde dann auch von Melde, der schon die angestrichene Stimmgabel benutzt hatte, um stehende Schwingungen in ausgespannten Saiten zu erzeugen (ib. 109 u. 111), übernommen und verschiedene Methoden angegeben, den erregenden Strom zu unterbrechen (Wied. Ann. 21, p. 452, 1884). Nachdem Puluj (ib. 31, p. 1033, 1887) eine Methode angegeben hatte, mit Hilfe einer intermittierenden Phosphoreszenzlampe den Schwingungszustand einer Saite des Meldeschen Apparates objektiv darzustellen, gelang es Krigar-Menzel und M. Raps, die Saitenschwingungen photographisch darzustellen (ib. 44, p. 623, 1891, und 50, p. 444, 1893), und zwar zunächst auf sehr einfache Weise die gestrichene Violinsaite, welche dann eine der Theorie entsprechende Kurve darstellt. Komplizierter war die Methode zur Photographie der gezupften Saite, diese gelang nur mit Hilfe eines besonders konstruierten Zupfapparates. Schon früher war die subjektive optische Methode für die Schwingungsbewegung von Saiten ausgebildet durch Lissajous (C. R. 44, p. 727, 1857). Diese Methode ist von Helmholtz vervollkommnet und er hat dem Apparat den Namen Vibrationsmikroskop gegeben (Tonempfindungen 6. Aufl., p. 137; s. unten).

Bei schwingenden Metallsaiten stellte sich schon frühzeitig heraus, daß die wirklichen Schwingungen von den theoretisch geforderten mehr oder weniger abweichen, weil die Saiten weder absolut bieg-

sam sind, noch ihre Elastizität nur durch die spannenden Gewichte erhalten. Die Ursache ist die Steifigkeit der Saiten, deren Einfluß von N. Savart (1791—1841; Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, T. 6, 1842) untersucht ist und durch eine Näherungsformel ausgedrückt werden sollte. Daß die zu dieser experimentell gefundenen Regel von Duhamel (Compt. Rend. 14, 1842) versuchte Theorie nicht richtig ist, wurde von A. Seebeck (1805—1849) bewiesen (Dove, Repertorium, Bd. 8, und Abh. der Jablonowskischen Gesellsch. 1846).

Die Theorie transversal schwingender Stäbe ist von Euler schon im Tentamen nov. theor. mus. 1739, c. 1, § 23, angedeutet, und, nachdem D. Bernoulli (1742) darüber eine Arbeit in den Petersburger Kommentaren veröffentlicht hatte, dann vollständig in Methodus inveniendi curvas etc., Addita. I, 1744, p. 245, und Investigatio motuum 1779, I, p. 103, gegeben. Danach verhalten sich die Grundtöne und die gleichartigen Obertöne wie die Dicken der Stäbe und umgekehrt wie die Quadrate der Längen. Für Blechstreifen ergibt sich ihm das Gesetz $t^2 = \frac{l^3 \cdot \gamma}{\varepsilon}$, wo t die Schwingungszeit, l die Länge, γ das Gewicht, ε die absolute Elastizität des Streifens ist.

Auch über die Schwingungen von Ringen, Glocken und Pauken hat Euler theoretische Untersuchungen angestellt (Nov. comm. Petrop. 10, p. 243 u. 261, 1764/66); aber die Ergebnisse sind trotz der Versuche Golvolins (Act. Petrop. 1781, II) nach den sorgfältigen Experimenten Chladnis (Entdeckungen über die Theorie des Klanges, Leipzig 1787) nicht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Versuche. Chladni ist auch der erste, welcher die Schwingungen einer Stimmgabel richtig darstellt und aus den Schwingungen eines gestreckten Stabes mit zwei Knoten ableitet und zeigt, daß beim Biegen eines solchen Stabes die Knoten näher zusammenrücken. Ein Teil der Chladnischen Resultate war schon von Matthew Young über Transversalschwingungen gefunden (Enquiry into the prim. phen. of sounds, Dublin 1784). Das Resultat der Chladnischen Versuche über Transversalschwingungen von Stäben gibt er folgendermaßen an: Die Töne verschiedener Stäbe verhalten sich bei einerlei Schwingungsart (d. h. ob der Stab einseitig eingeklemmt, an zwei Punkten geklemmt usw. schwingt) umgekehrt wie die Quadrate der Längen, direkt wie die Dicke und die Quadratwurzel aus der Steifigkeit und umgekehrt wie die Quadratwurzel aus der Schwere.

Die Transversalschwingungen von Saiten finden Anwendung in der Äolsharfe. Sie ist zuerst erwähnt in den Kommentaren des Erzbischofs Eustathios von Tessalonich (12. Jahrh.; Ed. Rom. 1542—1550). Dann von Alb. Kircher (Phonurgia 1673) wieder ausgegraben, dann in England mehrfach beschrieben (siehe Lichtenberg, Göttingischer Taschenkalender 1789, p. 129) und von Matthew Young (l. c.) eingehend untersucht und erklärt.

Die Theorie der schwingenden Stäbe, wie sie Euler geliefert hatte, ist dann erweitert von Poisson (Mém. de l'acad Paris 8, p. 484, 1824) und Cauchy (Exerc. de Math. III, p. 270), abschließend behandelt von Seebeck (Ber. d. sächs. Ges. d. W., Leipz. 1846/47, p. 159). Sie behandeln alle Stäbe von konstantem Querschnitt. Stäbe mit variablem Querschnitt behandelt Strutt (The theory of sound, London 1877, I, p. 240) und stellt die Differentialgleichung auf. Lösung derselben für den Fall eines konischen Stabes bietet Kirchhoff (Mon.-Ber. Akad. d. Wiss. Berlin 2. 10. 1879) mit dem Resultat, daß der konische Stab etwa siebenmal so große Amplitude haben kann als ein zylindrischer bei gleichem Material und gleicher Schwingungsdauer. Eine Ergänzung zu dieser Arbeit lieferte Meyer zur Capellen (Wied. Ann. 33, p. 661, 1888) für Schwingungen eines dachartigen Stabes in Richtung der First.

Die Schwingung eingeklemmter Stäbe sichtbar zu machen, diente das Wheatstonesche Kaleidophon (Quart. Journ. 11, 1827), welches wesentlich durch Melde als Universalkaleidophon aus zwei Metallstreifen verbessert wurde (Pogg. Ann. 115, p. 117, 1862, und 120, p. 660, 1867). Während diese Apparate subjektive Beobachtung fordern, stellt die Lissajoussche Methode der Reflexion eines parallelen Lichtbündels von zwei schwingenden Spiegeln die zusammengesetzte Schwingung objektiv dar. Früher hatte er schon das Vibrationsmikroskop mit schwingendem Objektiv konstruiert (C. R. 44, p. 727; 45, p. 48; 76, p. 878, 1857—73). Das Vibrationsmikroskop erhielt durch Helmholtz etwas abgeänderte Form (Lehre von den Tonempfindungen 1863, p. 138). Für den Apparat mit den Spiegeln schlägt Lissajous den Namen Phonoptometer vor. Zur optischen Analyse von zusammengesetzten Schwingungen schlägt Töpler die stroboskopischen Scheiben vor (Pogg. Ann. 128, p. 138, 1866).

Die Schwingung von Häuten hat schon Euler eingehend behandelt (Nov. Comm. Petrop. 17, p. 449, 1773), aber eine experimentelle Prüfung durch Chladni (Entdeck. ü. d. Theorie d. Klanges, 1787) zeigte wenig Übereinstimmung mit den theoretischen

Ergebnissen. Er benutzte zuerst die Methode, die Klangfiguren schwingender Platten durch aufgestreuten Sand nachzuweisen. Er behandelt Kreisscheiben von Messing und Glas am häufigsten, dann auch quadratische Scheiben, die er in verschiedenen Einklemmungspunkten untersucht, und weil er zuerst meinte, daß die Knotenlinie bei einer Kreisscheibe, wo er neben dem Einklemmungspunkt noch einen zweiten Punkt festhält, einen in die Länge gezogenen Kreis darstelle, untersucht er auch elliptische Scheiben und sechseckige ohne eine theoretische Behandlung der Figuren. Endlich erzeugt er auch mit angestrichenen Glocken verschiedene Tonschwingungen; den Schwingungszustand zeigen die Wellen auf der Oberfläche des in die Glocke gefüllten Wassers. Chladni hat 80 verschiedene Klangfiguren dargestellt. Mit diesen Figuren bzw. den Schwingungen der Platten beschäftigte sich dann Strehlke (Pogg. Ann. 4, p. 205, 1825) und fügte der Chladnischen Anordnung die bekannte Klemmgabel hinzu, um die Platten bequem einspannen zu können. Savart erzeugte die Figuren mit Sand und Lykopodium, es zeigte sich, daß der feine Staub nahezu entgegengesetzte Bewegung ausführt als der staubfreie Sand (Ann. de Chim. et de Phys. II, 36, 1828) und Faraday erklärt den Vorgang durch Luftströme, die durch die schwingende Platte erzeugt werden (Phil. Trans. 1831 und Pogg. Ann. 26, p. 195, 1832).

Poisson versuchte, die Eulersche Theorie zu verbessern (Mém. de l'acad. Paris 8, p. 499, 1824), ohne jedoch eine Übereinstimmung mit den Experimenten zu erreichen. Mehr Übereinstimmung findet die Theorie von Sophie Germain, die drei Abhandlungen der Pariser Akademie 1811, 1813 und 1815 überreichte und deren Ergebnisse zusammengefaßt sind in Remarques sur la théorie des surfaces élastiques 1821 und Remarques sur la nature etc. 1826. Poisson kommt auf die elastischen Scheiben noch einmal zurück in der Abhandlung Sur l'équilibre et le mouvement des corps élastiques (Mém. d. l'acad. 1829, p. 237). In seiner berühmten Abhandlung „Über das Gleichgewicht und die Bewegung einer elastischen Scheibe" zeigt Kirchhoff (Crelles Journ. 40, 1850, und Ges. Abh., p. 237), daß die Theorie von S. Germain unmöglich, daß Poissons Theorie nur in einem bestimmten Falle zulässig ist, und er entwickelt für Kreisscheiben die allgemeingültige Theorie und teilt hier, wie auch in Pogg. Ann. 81, p. 258, 1850, genaue Messungen von Strehlke mit, welche die Theorie bestätigen und ebenfalls den Angaben Chladnis in seiner Akustik entsprechen.

Erzeugung Chladnischer Figuren auf leichten, wenig elastischen Scheiben durch erzwungene Schwingung hat Elsas (Wied. Ann. 19, p. 474, 1883, und 20, p. 468, 1883) gezeigt. Die Versuche, die Theorie auch für quadratische Platten allgemein zu entwickeln, wie sie zuerst von Jacob Bernoulli (Nov. acta Petrop. 1787), dann von Lord Rayleigh (Die Theorie des Schalles [Neesen] I, p. 278, 1880) ausgeführt sind, haben noch nicht zu einer exakten Lösung geführt. Angenäherte Resultate findet Tanaka (Wied. Ann. 32, p. 670, 1887).

Außer den transversalen Schwingungen von Stäben hat Chladni auch zuerst die „drehenden“ Schwingungen untersucht (Akustik, p. 110), für welche Biot (Experimentalphysik [Fechner], 2. Aufl. 1829, II, p. 64) die Bezeichnung spiralförmige Schwingung vorschlägt. Dieselben folgen den alsbald anzugebenden Gesetzen der longitudinalen Schwingungen. Genauer untersucht sind sie von Savart (s. Poisson, Mém. de l'acad. Paris 8, p. 456) und Wertheim (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 50, p. 262, 1857), wobei sich ergab, daß die Messung der Schwingungszahlen für den longitudinalen Grundton und für drehende Schwingung ein vortreffliches Mittel ist, das Verhältnis der Querkontraktion zur Längendilatation zu bestimmen. Wertheim fand für verschiedene Substanzen das Verhältnis übereinstimmend nahezu $= 1/3$.

Schallwellen.

Die longitudinalen Schwingungen der Luft als Schallwellen sind schon im Altertum ihrer Entstehung nach bekannt gewesen. Heron (Opera I, p. 8) spricht bereits von der Schwingung der Luftmoleküle, welche einen Stoß auf die benachbarten weitergeben und dann vermöge ihrer Elastizität zurückschwingen, so daß eine Verdichtung entsteht, die sich fortpflanzt und der eine Verdünnung folgt. Wenn bisweilen auch noch in neueren Büchern auf Vitruv als Erfinder der ersten Wellentheorie des Schalles hingewiesen wird, so muß ich bekennen, in seiner Architektur nichts davon gefunden zu haben, wohl aber, daß Vitruv weder Aristoxenos noch Heron verstanden hat, sondern absoluten Unsinn aus den griechischen Originalen zusammengeschrieben hat. Die erste Wellentheorie gibt Huygens (Traité de la lumière, 1690); denn bei Grimaldi, welcher in seiner Physico-Mathesis, 1665, p. 18, wohl von einer Analogie zwischen den Wasserwellen und der Ausbreitung des Lichtes spricht, und in Prop. 22 die Interferenz und in Prop. 29 die Diffraktion an Metallgittern entdeckt, aber doch nicht zu einer

Ableitung aus der Wellenbewegung durchdringt, kann von einer Wellentheorie nicht geredet werden. Auch bei Huygens interessiert uns hier nicht seine Erklärung der optischen Erscheinungen (darüber s. unten), sondern nur das erste Kapitel, wo er die Undulationstheorie vorträgt. Es wird gewöhnlich nicht beachtet, daß Huygens nicht von transversalen, sondern longitudinalen Wellen ausgeht. Das hängt mit seiner Stellung zu Descartes zusammen, so daß er die Erregung der Lichtstrahlen auf einen Druck zurückführte. So sind die longitudinalen Wellen zuerst theoretisch behandelt. Diese Vorstellung ist auch der Grund, warum er die Polarisation nicht fand. Darum vergleicht Huygens auch das Licht mit dem Schall, aber während dieser aus longitudinalen Schwingungen der Moleküle der elastischen Körper besteht, schwingt beim Licht der Äther. Noch auf einen oft begegnenden Irrtum muß ich aufmerksam machen. Huygens sagt in bezug auf den ordentlichen Strahl bei der Doppelbrechung, er pflanze sich sphärisch fort, der außerordentliche aber sphäroidisch; das wird oft so aufgefaßt, als ob er doch gemeint habe, die kleinen Teile des Äthers hätten sphärische oder sphäroidische Schwingungen. Davon ist nicht die Rede. Die Teilchen schwingen nur longitudinal, aber die Widerstände sind nach den verschiedenen Richtungen verschieden groß, daher die Oberfläche gleicher Phase in letzterem Falle sphäroidisch.

Daß die Schallschwingungen longitudinal sind, hat schon Newton (Princ., p. 355) ausführlich auseinandergesetzt, deren geradlinige, nach allen Seiten gleichförmige Fortpflanzung erklärt und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit proportional der Quadratwurzel aus Elastizität dividiert durch Dichtigkeit gefunden (p. 363). Die Zeit für den Fortschritt um eine Wellenlänge ist gleich der Schwingungsdauer eines Moleküls um seine Gleichgewichtslage Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Luft gibt er nach Mersenne Beobachtungen (Ballistica, 1644. Prop. 35) zu 920—1085 engl. Fuß an Jedoch hat Newton nicht eigentlich Wellen im Auge, er redet nur von „pulsus" und denkt sich die Stöße von Molekül zu Molekül fortgepflanzt; darum hat er die eigenartige Auffassung, daß die Dicke der Luftteilchen eine wesentliche Rolle spiele; denn durch diesen Raum gehe der Druck instantan (!). Wenn wir z. B. annähmen, die Dicke eines Luftteilchens verhielte sich zum Zwischenraum zweier Nachbaren wie 1 : 9, so würde sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit um $^1/_9$ vermehren (!). Immerhin wurde Derham dadurch veranlaßt, die Schallgeschwindigkeit zu messen (Phil. Trans.

Nr. 313, p. 3; diese ersten Jahrgänge der Phil. Trans. sind als Sammelbände mit großer Zeitverzögerung erschienen, daher hier die Nummern angegeben werden). Seine ausgedehnten Versuche führten zu dem von Halley und Flamstead auch gefundenen Wert von 1042′ engl. Derham konstatierte dabei zuerst, daß die Schallgeschwindigkeit unabhängig von der Intensität des Schalles sei, dagegen in der Windrichtung größer als gegen den Wind.

Es machte aber einige Schwierigkeit, sich vorzustellen, warum die Luft imstande sei, gleichzeitige Töne verschiedenster Schwingungszahlen ungestört zu leiten. Mairan (Discours sur la prop. du son etc., Mém. de l'acad. Paris 1737) stellte sich in Analogie zu Newtons Lichttheorie vor, daß jeder Ton von einer einzigen Gruppe gleichartiger Moleküle fortgepflanzt werde, so daß die Luft der Anzahl der möglichen Töne entsprechend verschiedene Gruppen habe. Euler widerlegt diese Ansicht (Nova theor. lucis et cal., Opuscula var. arg., 1746, p. 169).

Die älteren Versuche über die Geschwindigkeit des Schalles in Luft waren ungenau, da sie die Luftströmung entweder nicht beachteten, wie Mersenne und Gassendi, oder deren Einfluß leugneten. Mersenne fand (Harmonic., libri XII, 1636) 1380 Pariser Fuß, Gassendi wahrscheinlich früher (Petri Gassendi opera omnia, 3 Jahre nach seinem Tode 1658, Bd. III) 1473 Pariser Fuß, Borelli (1608—1679) und Viviani (1622—1703) fanden 1656 die Geschwindigkeit zu 1111 Pariser Fuß und leugneten den Einfluß des Windes (Saggi, Abschn. XI). Die Akademie der Wissenschaften in Paris ernannte eine Kommission, Cassini (1625—1712), Maraldi (1665—1729) und de la Caille, zur Untersuchung dieser Frage. Das Resultat war 173 Toisen = 1038′ (Sur la propag. de son, Mém. de l'acad. 1738). Dabei stellten sie fest, daß, wenn der Wind in der Richtung der Distanz weht, die Geschwindigkeit desselben entweder abgezogen oder zugezählt werden müsse. Die Geschwindigkeit ist unabhängig vom Druck, wächst mit der Temperatur und ist nach allen Richtungen die gleiche. Die Versuche sind später noch einmal durchgerechnet von Le Roux (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. IV, 12, 1868). Danach ist das Ergebnis nicht 337 m, wie jene gefunden hatten, sondern 332. Die Versuche einer 1822 arbeitenden Pariser Kommission und der bald nachher in Amsterdam arbeitenden holländischen Vereinigung sind in Pogg. Ann. 5, p. 351 und 469, 1825, zusammengefaßt. Die Franzosen fanden auf 0^0 reduziert 331,2 m, die Holländer 332,26 m. Die letzteren Beobachtungen sind von Schröder van der Kolk (Pogg.

Ann. 124, p. 456, 1865) noch einmal berechnet zu 332,77. Derselbe macht Bedenken geltend gegen die bisher durchgeführten Methoden.

Andere Bedenken gegen dieselben veranlaßten Regnault (1810 bis 1878), die persönlichen Fehler der Beobachter auszuschalten und durch den elektrischen Strom die Zeiten der Erregung des Schalles und der Ankunft desselben an der Beobachtungsstation selbsttätig registrieren zu lassen. Er beobachtete sowohl in den Wasserleitungsröhren von Paris, wie im freien Raume; für erstere Versuche ergab sich der Mittelwert 330,3, für freie Luft 330,7, während Le Roux nach ähnlicher Methode 330,66 erhielt (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. IV, 12, 1868). Regnaults Beobachtungen siehe Mém. de Paris 37. Die bei diesen Regnaultschen Versuchen sich ergebende Abnahme der Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit der Intensität des Schalles findet erst durch das Verhältnis der spezifischen Wärme der Gase bei konstantem Druck und konstantem Volumen seine Aufklärung. Die direkte Methode zur Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft ist mit besonderer Sorgfalt auch von Benzenberg (Gilb. Ann. 35, p. 383; 39, p. 136; 42, p. 1; 1810—1812) angewendet und die Unabhängigkeit vom Druck, aber nicht von der Feuchtigkeit, nachgewiesen. Neben dieser direkten Methode, die immerhin von vielen Fehlerquellen beeinträchtigt ist, sind dann indirekte Methoden angewendet, davon weiter unten mehr.

Daß auch feste Körper longitudinal schwingen können, war wohl schon im Altertum bekannt; aber den physikalischen Nachweis lieferte erst Chladni (1756—1827) in der Arbeit „Longitudinalschwingungen der Stäbe und Saiten", Erfurt 1796. Er vergleicht transversale und longitudinale Schwingungen eines Stabes, den Unterschied, ob der Stab in der Mitte oder an den Enden doppelseitig oder einseitig eingeklemmt ist, hat auch die verschiedenen Erregungsarten — durch Schlag, durch längs gerichtetes Anstreichen mit dem Bogen und des Reibens, für Metall- und Holzstäbe mit dem geharzten Tuchlappen, für Glas mit nassem Leinenflicken — untersucht. Er findet neben dem Grundton auch die Obertöne und gibt für letztere auch die richtigen Schwingungsformen an. Die Formel für die Tonhöhe eines Stabes ist freilich nicht richtig, aber er untersucht die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Stäben mit Hilfe der Töne (Voigts Mag. I, 1, 1799). Ausführlicher sind diese Longitudinalschwingungen von Savart (Ann. de Chim. et de Phys. 65, p. 337) untersucht; er weist durch das Sphärometer nach, daß ein in der Mitte eingeklemmter Stab eine durch Anschlag erzeugte Schwingung wirklich ausführt. Von Savart (1791—1841)

rührt auch die Methode her, die Schwingung einer Röhre dadurch sichtbar zu machen, daß in dieselbe trockener Sand gestreut wurde. Er rieb die in ihrer Mitte eingeklemmte Röhre dann mit einem nassen Tuche oder auch mit einem mit Kolophonium bedeckten Lappen. Irrtümliche Feststellungen über die entstehenden Wellenlängen führten Savart zu verkehrten Schwingungszahlen, die durch Gebrüder Weber korrigiert wurden (Wellenlehre, p. 555) und mit Chladnis Theorie erklärt werden konnten.

Von Laplace (Gilb. Ann. 57, p. 234, 1817) und Poisson (Mém. l'Inst. Paris 1819, p. 396) wurde die Theorie der longitudinalen Schwingungen von Stäben abgeleitet und die Formel gegeben: $c = \sqrt{\frac{g \cdot p}{d}}$, wo d die Dichtigkeit des Stabes, p die Elastizität, g die Schwerebeschleunigung ist. Durch die Überlegung, daß bei einem in der Mitte eingeklemmten Stabe die ganze Länge des Stabes für den Grundton desselben eine halbe Wellenlänge ist, kam Wertheim (1815—1867, Pogg. Ann., Erg. 2, p. 497, 1848) zu der indirekten Methode, die Tonhöhe des geriebenen Stabes zur Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu benutzen, da $n = \frac{c}{2l}$ ist, wo l die Länge des Stabes, n seine Schwingungszahl bedeuten; mit ihrer Hilfe bestimmte er die Schallgeschwindigkeit vieler Substanzen, es war dabei nur nötig, die Tonhöhe richtig zu bestimmen. Das aber ist bei der Vergleichung mit einem längst bekannten Ton einer Pfeife oder Saite sehr ungenau.

Darum war es ein Fortschritt in der Bestimmung, daß Kundt (1839—1894, Pogg. Ann. 127, p. 508 u. 519, 1866) eine Methode der Vergleichung der Schallgeschwindigkeiten in den verschiedenen festen Körpern mit der der Luft fand. Der in der Mitte eingeklemmte Stab, der longitudinal gerieben wird, überträgt seine Schwingungen auf eine Luftsäule in einer horizontalen Röhre, in welcher die Wellenlängen durch Korkstaub sichtbar gemacht werden. Ist l die Länge des Stabes, l' der Abstand zweier Knoten in der Luftsäule, dann verhält sich $l : l' = c : c'$. Diese für alle zum Tönen durch Reiben geeigneten Stoffe zuverlässige Methode ist von sehr vielen Experimentatoren angewandt. Auf Stoffe, welche man nicht durch Reiben in Schwingungen versetzen kann, ist von Stefan (Wien. Berichte 57, p. 697) die Kundtsche Methode anwendbar gemacht, z. B. auf Wachs, Kautschuk usw. Man bestimmt für einen tönenden Stab nach Kundt die Schallgeschwindigkeit und die Tonhöhe, klebt den aus Wachs geformten Stab an das Ende des tönenden Stabes und

bestimmt nun die Tonerniedrigung, welche eintritt, wenn man den Stab wieder reibt. Aus dieser Tonerniedrigung, der Länge und dem Gewicht des Wachsstabes ergibt sich die Schallgeschwindigkeit.

Eine von Savart (l. c.) angegebene, von W. Weber vervollkommnete Methode (Wellenlehre, p. 549) durch Übertragung der transversalen Schwingungen eines Stabes auf solche Stäbe, die nicht direkt angestrichen oder gerieben werden können, ist von Warburg (Pogg. Ann. 136, p. 285, 1869) angewandt für Stearin, Wachs, Paraffin, Talg. Für membranöse Körper hat F. Melde (1831—1896) abschließende Versuche gemac ht(Wied. Ann. 45, p. 568 u. 732, 1892). Eine einfache Ableitung der Schallgeschwindigkeitsgleichungen für feste, flüssige und gasförmige Körper gibt Weyrauch (Wied. Ann. 23, p. 147, 1884).

Die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten ist erst spät untersucht. Weil man die Elastizität des Wassers leugnete, hielt man die Fortpflanzung der Schallwellen in Flüssigkeiten überhaupt für unmöglich. Daß der Schall auch durch Wasser gleeitet wird, bewies Nollet (Mém. de l'acad. 1743) dadurch, daß er sich selbst in das Wasser der Seine setzte und die verabredeten Schallsignale in gleicher Tonhöhe, aber veränderter Intensität hörte, und Arderon (Phil. Trans. Nr. 486) zeigte dasselbe für verschiedenartige Schallquellen. Daß nicht die im Wasser vorhandene Luft die Schalleitung leiste, bewies Nollet, indem er luftfreies Wasser anwandte. Daß die Töne in einer Flüssigkeit weiter fortgepflanzt werden als in Luft, zeigte Perolle durch Versuche in H_2O, Olivenöl, Terpentinöl, Weingeist (Mém. de l'acad. di Turin 1790/91). Eine Zusammenfassung der Versuche über feste und flüssige Leiter der Schallwellen gab er in Voigts Mag. 10, St. 2, p. 39). Ein Versuch, eine Theorie dieser Fortpflanzung zu geben, rührt von v. Arnim her (Gilb. Ann. 4, p. 112, 1800). Doch erst Poisson lieferte die Theorie (Traité de Mécanique, Bd. 6, § 667) vollständig. Entscheidende Versuche stellten erst Colladon und Sturm im Genfer See an über die Geschwindigkeit des Schalles (Pogg. Ann. 12, p. 171, 1828) mit dem Ergebnis, daß $c = 1435$ m sei.

Durch Wertheim wurden diese Bestimmungen auf andere Weise einwandfrei gemacht. Schon Cagniard de la Tour (1777 bis 1859) brachte in einer Röhre eingeschlossene Flüssigkeitssäulen zum Tönen durch Reiben der Röhre, und berechnete daraus die Schallgeschwindigkeit (Ann. de Chim. et de Phys. 56, 1835), aber vollkommener gelang es Wertheim, die Flüssigkeitssäule durch einen Flüssigkeitsstrom zum Tönen zu bringen und dadurch die

Schallgeschwindigkeit zu berechnen (ib. Ser. 3, 23; Pogg. Ann. 77, p. 429, 1849). Mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit wollte J. Meldercreuz (1715—1785) bereits eine Entfernungsbestimmung ausführen und arbeitete eine Methode aus (Abhandl. der schwed. Akad. 3, p. 82, 1741), um aus zwei Beobachtungsorten den Ort der Schallerregung zu bestimmen. Er will den Ort, wo Minenarbeiter am Werke sind, auf diese Weise ermitteln.

Für die Theorie der Fortpflanzung der Schallwellen in Flüssigkeiten sind noch folgende Arbeiten grundlegend gewesen. Poisson (Journ. de l'école polyt. 14, p. 319, 1818) gibt die allgemeine Theorie, die Geschwindigkeit der Fortpflanzung (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 2, 23, p. 5, 1823). Speziell mit den Flüssigkeiten beschäftigt sich auch Laplace (Bull. des sc., Soc. philom. 1821, p. 83 u. 161). Die Schallgeschwindigkeit in Gasen (ausschließlich Luft) ist von Dulong (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 2, 41, p. 113, und Pogg. Ann. 16, p. 455, 1829) mit Hilfe einer Orgelpfeife bestimmt unter Benutzung der Gleichung: $v = \sqrt{g \cdot \sigma \cdot b / s \cdot K}$, wo b der Barometerstand, s die Dichtigkeit des Gases, σ die Dichtigkeit des Quecksilbers, g die Fallbeschleunigung und K eine Konstante ist, die sich alsbald als das Verhältnis der spezifischen Wärmen c_p/c_v herausstellte. Er untersuchte O, H, Kohlensäure, Kohlenoxyd, Stickoxyd, ölbildendes Gas, indem er für Luft die Geschwindigkeit 333 m voraussetzte. Auch Regnault bestimmte mit der direkten Methode (s. oben) die Schallgeschwindigkeit in Gasen wie in Luft, und zwar für H, Kohlensäure, Stickoxydul, Ammoniak. Auf Dämpfe von Wasser, Schwefelkohlenstoff, Alkohol, Äther und Äthylchlorid wandte Mousson (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 53, p. 257, 1858) die Dulongsche Methode an, wenn die Dämpfe gesättigt sind, ohne daß Kondensation eintritt. Sehr bequem ist auch für Gase und Dämpfe die Methode der Staubfiguren nach Kundt (s. oben). Er selbst behandelte Quecksilberdampf (Pogg. Ann. 127, p. 497, 1866; 135, p. 337, 1868; 157, p. 353). Chlor-, Brom- und Joddampf wird nach der Kundtschen Methode von Strecker bearbeitet (Wied. Ann. 13, p. 20, 1881). Eine schon von Rayleigh (1842–1919) eingeführte Methode, mittels kleiner Scheibchen die Knotenpunkte zu bestimmen, benutzt Beyme (Dissertat. Zürich 1884). Endlich führte Jaeger (Wied. Ann. 36, p. 165, 1889) eine sorgfältige, in dieser Periode abschließende Bestimmung für Ätherdampf, Alkoholdampf, Wasserdampf, Acetondampf durch nach der Kundtschen Methode.

Daß die Reflexion der Schallwellen schon im Altertum bekannt war, ist oben erwähnt. In der Neuzeit beschäftigte sich

Pater Mersenne (1588—1648) zuerst wissenschaftlich mit der Reflexion (Harmonicarum, libri XII, p. 162, 1636) in vielen Versuchen. Er konstatierte, daß eine Wand, von welcher ein Ton (Silbe) reflektiert gehört werden solle, wenigstens 12 Toisen entfernt sein müsse; stehe sie näher, so wirke sie nur schallverstärkend, denn das Ohr könne in einer Sekunde nur etwa 10 Silben hören. Bacon von Verulam ergänzt dies durch die Erklärung, daß ein Echo ein-, zwei-, dreisilbig sei, je nach der Entfernung der reflektierenden Wand (Sylva sylvarum II, p. 782, 1665). Beide sprechen von der Schallreflexion wie von der Lichtreflexion, ohne einen Beweis anzustreben, während Athanasius Kircher nur eine Anzahl merkwürdiger Echoerscheinungen aufführt. Diese Aufzählung und Beschreibung war auch für längere Zeit das einzige, was die Herren Physiker auf dem Gebiete leisteten, bis Euler eine richtige Erklärung für das Echo lieferte (Mém de l'acad. Berlin 1765/67, p. 335).

In enger Verbindung mit den Betrachtungen über das Echo stand das Sprachrohr. Auch dies ist in Form der Sprechmasken für Schauspieler schon bei den Griechen bekannt. Dasselbe erfunden zu haben ist das Verdienst von Moreland (An account of a speaking trumpet etc., London 1671). Er erklärte dasselbe durch die Reflexion der Wellen an den festen Wänden des Rohres. Darum gab man ihm große Längen (7 Fuß!), bis Cassegraine (Journ. d. scavans 1672, p. 125) dem Sprachrohr die Form einer gleichseitigen Hyperbel gab und damit die Schallwellen in bestimmte Richtung lenkte. Daß man auf die Kegelschnitte als Grundform für das Sprachrohr verfiel, hat nicht nur in mathematischer Ableitung seine Begründung, sondern in der Ausmessung der bei Syrakus liegenden Grotte della favella, welche parabolisch ausgehauen ist, durch Kircher, der in ihr die außerordentliche Schallverstärkung beobachtete (Musargia univ. II, p. 291). Erst Lambert kommt durch theoretische Überlegung dazu, aus Ellipsoid und Paraboloid ein Sprachrohr von bedeutender Verstärkung zu konstruieren (Mém. de l'acad. Berlin 1763).

Während bei den bisherigen Reflexionserscheinungen stets die Zurückwerfung von einem dichten Medium stattfand, so daß an der Wand stets die Amplitude 0 ist und die reflektierte Welle mit umgekehrter Elongation den Rückweg antritt, hat Weber zuerst auch beim Übergang von einem dichteren Medium in ein dünneres eine Reflexion also mit gleichem Vorzeichen der Amplitude nachgewiesen. Es ist dieses Ergebnis von größter Bedeutung für die stehenden Wellen in einer beiderseits offenen Röhre (Wellenlehre, p. 511ff.) und wird uns bei den Orgelpfeifen noch beschäftigen.

Daß die Schallwellen auch gebrochen werden, ist erst sehr spät nachgewiesen durch Hajech (Pogg. Ann. 103, p. 163, 1858). Zahlreiche Versuche an H, Ammoniak, Leuchtgas, Kohlensäure, Brunnenwasser und Kochsalzlösung bestätigten das Gesetz sin v' : sin v $= c' : c$.

Die Interferenz der Wasserwellen war (s. oben) schon früher bekannt und von den Gebrüdern Weber eingehend behandelt. Sie zeigten auch, daß die Schallwellen interferieren. Poisson hatte behauptet, daß, wenn ein Schall nach einer Richtung hin angeregt sei, z. B. von transversal schwingenden Stäben, auch die Fortpflanzung des Schalles wesentlich nur in dieser Richtung stattfinde, wenn auch die Wellen noch sphärisch seien, so sei die Intensität des Schalles in den zu der anregenden Richtung geneigten Wegen sehr viel kleiner (Ann. de Chim. et de Phys. 22, p. 255, 1823). Demgegenüber zeigen Gebrüder Weber an Stimmgabeln, daß der Ton in Richtung der Schwingung nicht wesentlich stärker gehört wird als in der dazu senkrechten Richtung, daß aber in einer geneigten Richtung zu beiden, die durch das Verhältnis der Breite der Stimmgabelzinke zu ihrer Dicke bestimmt ist, eine Interferenz der Wellen eintritt, die ein fast vollständiges Verschwinden des Tones erzeugt (Wellenlehre, p. 506ff., 1825). Diese Interferenz hat W. Weber allein genauer untersucht und bereits festgestellt, daß die Kurve völliger Tonlosigkeit eine Hyperbel ist, deren Asymptote durch die Mitte der Seitenflächen geht (Schweig. Journ. 48, p. 392, und 50, p. 247, 1827).

Zur Demonstration dieser Interferenz hat J. Herschel (1792 bis 1871) den gewöhnlich nach Nörrenberg genannten Interferenzapparat erfunden, eine Glasröhre teilt sich in zwei Arme, deren Länge sich um eine halbe Wellenlänge unterscheidet; dann vernichten sich beide Wellen durch Interferenz vollkommen (Phil. Mag., Ser. 3, III, 1833). Eine wesentliche Verbesserung brachte an diesem Apparat Quincke an (Pogg. Ann. 128, p. 177, 1866), indem er die beiden Zweige der Röhre durchschnitt und nun zwischen die Enden eines Schnittes Gummischläuche beliebiger Länge einschaltete und so bequem Verstärkung des Tones oder Aufhebung erhalten konnte. Diese Apparate können subjektiv benutzt werden, wenn man das eine Ende an das Ohr, das andere an die Tonquelle bringt, oder objektiv, indem man das Rohr mit dem Flammenmanometer verbindet, wie es König (Pogg. Ann. 122, p. 166, 1864) eingeführt hat. König ersetzt den Quinckeschen Apparat durch die posaunenartig ausziehbare Interferenzröhre.

Einen Interferenzapparat für schwingende quadratische Platten hat Hopkins hergestellt, indem er zwei runde Röhren in ein gemeinsames Ansatzstück einführt, welches oben durch eine Membran geschlossen ist, auf die man Sand streuen kann. Hält man diesen Apparat vertikal über zwei benachbarte Quadranten der Platte, so gibt es Aufhebung des Tones; bei gegenüberliegenden Quadranten erhält man Verstärkung der Schwingung der Membran, die man durch aufgestreuten Sand sichtbar macht (Pogg. Ann. 44, 1838). Spätere Untersuchungen, besonders die über Interferenz bei schwingenden Stäben und Stimmgabeln haben nichts über die Weberschen Resultate Hinausgehendes erbracht.

Bei den bisherigen Interferenzerscheinungen handelte es sich stets um Wellen gleicher Schwingungszahlen, aber es ist selbstverständlich, daß auch verschieden hohe Töne interferieren. Dann entstehen Schwebungen entsprechend der Differenz der Schwingungszahlen.

Diese Schwebungen in ihrem Wesen und ihrer Anwendung erkannt zu haben, ist das Verdienst von Andreas Sorge (1703—1788, Anweisung zur Stimmung der Orgelwerke, 1744), zuerst darauf hingewiesen zu haben, daß man diese Schwebungen benutzen könne zur Reinstimmung von Instrumenten. Um z. B. die Saite oder die Pfeife rein auf *a* zu stimmen, stellt er sich zunächst eine Stimmgabel her, welche mit *a* vier Schwebungen in der Sekunde gibt; dann stimmt er die Saite oder Pfeife so, daß er auch mit dieser vier Schwebungen in der Sekunde hat; so ist sie sicher auf rein *a* gestimmt. Ist die Differenz der Schwingungszahlen größer als 18, so erzeugen die Schwebungen einen „Kombinationston“, während die Zahl der Schwebungen nicht mehr feststellbar ist. Tartini nahm 1754 diese Sorgesche Entdeckung der Kombinationstöne wieder auf und daher werden sie meist Tartinische Töne genannt; besser heißen sie Differenztöne. Daß sie durch die Differenz der Schwingungszahlen entstehen, hat Hällström nachgewiesen (Pogg. Ann. 24, p. 438, 1832). Eine etwas abweichende Methode, um die Schwingungszahlen der Kombinationstöne festzustellen, wandte Scheibler an (Pogg. Ann. 32, p. 333, 1834). Lange zeigte dann, daß die Töne nicht subjektiv im Ohr erst entstehen, sondern objektiv nachweisbar sind (Pogg. Ann. 101, p. 493, 1857). Helmholtz (1821—1894) bestätigte 1856 zunächst Hällströms Theorie, zeigte dann aber, daß es neben den Differenztönen auch Summationstöne gibt, die ebenfalls z. T. objektiv sind, unter Umständen aber nur subjektiv (Ges. Abh. I, p. 256 u. 263). Quincke bedient sich zum Nachweis der Ob-

jektivität der Kombinationstöne seiner Interferenzröhre (Pogg. Ann. 128, p. 186, 1866), wodurch er imstande ist, für gewisse Töne den Nachweis zu erbringen, daß sie erst im Ohre entstehen. Die Schwierigkeit, die Entstehung solcher subjektiven Töne zu erklären, veranlaßte Helmholtz, statt des Gesetzes, daß die Kraft, mit welcher das schwingende Teilchen zur Gleichgewichtslage zurückgetrieben wird, proportional der Elongation ist, also $\varphi = -\varkappa \cdot y$, anzunehmen, daß es sich hier um Amplituden handele, wobei auch die zweite Potenz der Elongation von Einfluß sei, also $-m \cdot \varphi = a\,y + b\,y^2$ (Pogg. Ann. 99, p. 532, 1856). Diese Theorie liefert auch die Kombinationstöne höherer harmonischer Obertöne.

Gegen die Helmholtzsche Theorie mußte bedenklich machen, daß bei Stimmgabeltönen, welche gerade für die Kombinationstöne gebraucht wurden, durch die Untersuchung von Kayser (Wied. Ann. 6, p. 465, 1879) nachgewiesen ist, daß sie der linearen Abhängigkeit genügen. Es zeigte nun R. König, daß, wenn n_1 und n_2 die Tonhöhen der primären Töne sind, Töne von den Schwingungszahlen $n_2 - \alpha\,n_1$ und $(\alpha + 1)\,n_1 - n_2$, wo α eine ganze Zahl ist, als „Stoßtöne" gehört werden (Pogg. Ann. 157 p. 177, 1876, und Wied. Ann. 39, p. 395, 1890). Er kommt damit zurück auf die Lagrangesche Erklärung, daß durch die Interferenz der beiden Töne „Stöße" entstehen und das Ohr eine solche periodische, hinreichend große Anzahl Stöße als Ton empfindet. In seinem Buche „Quelques expériences d'Acoustique", p. 147, 1882, erklärt König sogar, daß die Existenz von Summations- und Differenztönen überhaupt nicht sicher nachzuweisen sei. Diese Streitfrage ist von W. Voigt (1850—1920) durch eine systematische Untersuchung der Schwingungsgleichung für eine aus zwei einfachen Schwingungen bestehende Bewegung dahin gelöst, daß je nach der lebendigen Kraft der primären Schwingungen sowohl die Helmholtzschen Kombinationstöne wie auch die Königschen Stoßtöne entstehen müssen und daß im ersteren Falle die Differenztöne stärker sind als die Summationstöne, was durch Beobachtung schon bekannt war (Wied. Ann. 40, p. 652, 1890).

Resonanz.

Die heute so wertvolle Erforschung der Resonanz hat erst sehr spät eingesetzt. Daß sie praktisch in vielen Fällen schon im Altertum bekannt war, ist ja nicht zweifelhaft; sowohl die resonierenden Muscheln wie die Resonanzböden für Saiteninstrumente sind

bei Plinius bekannt, aber nur die Tatsachen ohne Verständnis. Erst Chladni (Akustik, 1802, III) beschäftigt sich physikalisch mit der Resonanz, aber noch nicht vollständig. Die erste Untersuchung der Resonanz lieferten Gebrüder Weber in der Wellenlehre. Sie unterscheiden zwei Arten der Resonanz: 1. die Übertragung der Schwingungen eines selbstschwingenden Körpers auf mitschwingende feste Körper, 2. die Erregung einer Selbstschwingung in einem elastischen Medium durch die Schwingung eines anderen Körpers. In die erste Gruppe gehört die Tonverstärkung durch Resonanzböden; sie nehmen jede beliebige Schwingung auf und verstärken den Ton wegen der größeren Oberfläche, von der die Schwingung der Luft übermittelt wird; aber sie geben keine stehenden Wellen. Das zeigen sie an Stimmgabeln und Saiteninstrumenten. Die zweite Art aber verlangt, daß der resonierende Körper selbst in stehenden Wellen schwingt; das ist nur möglich, wenn die mitgeteilte Schwingung einem Eigenton des resonierenden Körpers entspricht. Sie weisen diese stehenden Schwingungen durch Klangfiguren nach. Luftsäulen in offenen und einseitig geschlossenen Röhren können zur Resonanz gebracht werden durch einen Ton, der dem Grundton oder einem Oberton der Röhre entspricht. Den Einfluß der Resonanz auf die akustischen Verhältnisse großer Räume (Kirchen, Konzertsäle) untersuchen sie ebenfalls. Savart hatte auch die Übertragung der Schwingung einer Saite auf eine Holzplatte untersucht (Ann. de Chim. et de Phys. 19, 1822), aber er war auf die zweite Art Resonanz überhaupt nicht gekommen; seine Theorie wird von Gebrüder Weber richtig gestellt (Wellenlehre, p. 530—546). In beiden Fällen wird die Höhe des erregenden Tones nicht geändert durch die Resonanz, aber die Resonanz bezieht sich nicht auf alle im erregenden Tone mitklingenden Obertöne. Bei der Stimmgabel wird nur der Grundton verstärkt, nicht die hohen Obertöne, welche beim Anschlagen der Stimmgabel mit erregt werden und gewöhnlich eine solche Intensität haben, daß man bei einer feinen Stimmgabel nur diese und nicht den Grundton hört; letzterer wird erst durch die Resonanz herausgehoben.

Gebrüder Weber beobachten auch schon, daß ein Körper (Klaviersaiten, Stimmgabeln) durch Resonanz zum Selbsttönen gebracht werden kann (Wellenlehre, p. 542). Sie verwenden als Resonatoren auch Luftsäulen in offenen Zylindern, Flaschen usw. Erst durch Helmholtz 1863 sind Serien von Luftresonatoren konstruiert (Lehre von den Tonempfindungen, 6. Aufl. 1913, p, 72 u. 600) zur Untersuchung der Klangfarbe; es sind das die Kugel- und

Zylinderresonatoren. Aus solchen Zylinderresonatoren, in Verbindung mit Flammenmanometer, stellte R. König einen festen Klanganalysator her, wo in einem rotierenden Spiegel der Schwingungszustand der einzelnen Resonatoren sichtbar gemacht wird (Pogg. Ann. 122, p. 666, 1864, und 146, p. 171, 1872).

Schon Ohm hatte behauptet, daß das Ohr aus jedem Klang die einzelnen Schwingungen als einzelne Töne zu hören imstande sei (Pogg. Ann. 59, p. 513, 1843, und 62, p. 1, 1844), ohne jedoch den Klang als die Summe der einzelnen Töne zu definieren. Dagegen hatte Seebeck erklärt, dem Klange entspreche eine aus der Interferenz entstehende Schwingungsform und diese verschiedenen Formen bedeuten die Klangverschiedenheiten (Pogg. Ann. 60, p. 449, 1843, und 63, p. 353, 1844). Demgegenüber stellte Helmholtz in bezug auf Vokale die Klangfarbe als bedingt durch das Mitklingen der Obertöne fest (Pogg. Ann. 108, p. 280, 1859) und bildete eine Analyse der Klangfarbe in den Abschnitten 2—6 seiner Lehre von den Klangempfindungen aus unter Ausdehnung auf alle Klänge. Schon hatte Brandt festgestellt, daß Ohms Satz von der Fähigkeit des Ohres, die einzelnen Töne eines Klanges zu hören, richtig sei (Pogg. Ann. 112, p. 324, 1861) und Helmholtz führte im 4. Abschnitt seiner Tonempfindungen dies ausführlich durch. Er gründete auf den Satz von den Schwebungen und die Existenz der Obertöne seine Theorie der Konsonanz und Dissonanz. Die Konsonanz fordert für die Grundtöne und Obertöne schwebungsfreies Zusammenklingen, die Dissonanz bietet Störungen. Nach der Anzahl und Intensität der Schwebungen tritt die Dissonanz schärfer oder weniger scharf auf; aber man muß diese Untersuchung der Schwebungen auch auf die Obertöne beziehen. Diese Theorie ist im wesentlichen von Rayleigh (Theorie of sound, 2 Bde, 1877—1878) aufgenommen und durch Versuche bestätigt. Am meisten haben die Arbeiten von R. König (Wied. Ann. 14, p. 369, 1881, und 39, p. 403, 1890) über die Klangfarbe zur allgemeinen Anerkennung der Helmholtzschen Theorie beigetragen.

Einen Einfluß der Dämpfung auf die Resonanz hat ebenfalls Helmholtz nachgewiesen (l. c.) und eine Theorie der Resonanz mit Berücksichtigung der Dämpfung hat Strutt (= Rayleigh) (Phil. Trans. 1871, p. 77) aufgestellt, die eine wesentliche Verbreiterung und Verbesserung von Grinwis (Arch. Néerland. 8, p. 417, 1877) erfuhr. Die Resonanz in einem aperiodischen System ist von A. Christiani (Arch. Anat. Phys. 1878) untersucht und eine außerordentliche Breite der Resonanz beobachtet. Die Erscheinung der Resonanz ist zuerst

auf das von Huygens bereits entdeckte Prinzip der Koppelung zurückgeführt von Rayleigh (1842—1919), indem er die Wechselwirkung zwischen Erreger und Empfänger untersucht unter Zugrundelegung des Energieprinzips. Daß jeder schwingende Körper, besonders auch schwingende Luftsäulen, auch Wärmewirkungen anzeigen muß, hat zuerst Warburg experimentell nachgewiesen (Pogg. Ann. 134, p. 632, 1868, und 139, p. 89, 1870), und Kundt hat die Druckdifferenz in einer tönenden Luftsäule bis zu 2,12′ feststellen können (Pogg. Ann. 134, p. 563, 1868). Theoretisch ist das Problem dieser Dämpfung von Kirchhoff behandelt (Pogg. Ann. 134, p. 177, 1868), um von Schneebeli (ib., p. 335) experimentell und theoretisch durchgeführt zu werden. In der Arbeit von Rayleigh waren auch für erzwungene Schwingungen die Bewegungsgleichungen abgeleitet, welche gestatten, Amplitude, Phase und Energie in ihrer wechselseitigen Abhängigkeit zu bestimmen.

Gekoppelte Systeme sind zuerst von Huygens an zwei Pendeln beobachtet und versucht, deren „Sympathie" durch die Übertragung durch die Luft zu erklären (Journ. des scavants 1665, 26. 2.). Ellicot wies nach (Phil. Trans. 1739), daß die Luft an der Übertragung nicht beteiligt sei, indem er beide Pendel in luftdicht verschlossenen Kasten schwingen ließ, daß vielmehr die Wand und der Fußboden die Vermittlung der Schwingungen besorgte; er zeigte die Koppelung durch Holzfasern direkt. Theoretisch behandelte die Koppelung zuerst D. Bernoulli (Mém. Petersb. 1772), aber ausführlicher L. Euler (Nov. Comm. Petrop. 19, p. 302 u. 325, 1775, und Act. Petrop. 1779, I, p. 89). Dabei zeigte sich sowohl theoretisch wie experimentell, daß sich durch diese Koppelung eine neue Periodizität ausbildet, deren Verhältnis zur ursprünglichen Schwingungsdauer wesentlich durch das Maß der Dämpfung bedingt ist. Diese Frage ist in neuerer Zeit wieder in Fluß gebracht durch Warburg (Pogg. Ann. 136, p. 89, 1869), so daß das Verhältnis von Koppelung, Dämpfung und Resonanz für zahlreiche Arbeiten das Thema bildete. Oberbeck eröffnete den Reigen mit der Koppelung zweier Pendel durch eine Drahtspirale (Wied. Ann. 34, p. 1041, 1888). Die Theorie der Koppelung und Resonanz ist enthalten in dem allgemeinen Problem der Schwingungen von Systemen mit mehreren Freiheitsgraden, wie es von Rayleigh in seiner Theorie des Schalles (deutsche Ausgabe, p. 93) entwickelt ist. — Da die Differentialgleichungen für elastische und elektrische Schwingungen gleich sind, können die Resultate, welche bei Koppelung zweier ungedämpfter elektrischer Schwingungen gefunden sind, auf die

Schallschwingungen übertragen werden. v. Geitler behandelte die elektrische Koppelung (Wien. Ber. 1895, Febr. u. Okt.), Galitzin nahm dagegen magnetische Koppelung vor (Petersb. Ber. 1895, Mai u. Juni), ebenso gleichzeitig Oberbeck (Wied. Ann. 55, p. 623, 1895). Im folgenden Jahre nahm M. Wien die akustischen Koppelungserscheinungen auf und zeigte, daß die maximale Energie nicht, wie bisher angenommen war, mit maximaler Amplitude zusammenfällt. Die Größe der Differenz hängt wesentlich von der Dämpfung ab. Zwei Jahre später behandelt er die Rückwirkung eines resonierenden Systems auf das erregende, dabei unterscheidet er Kraftkoppelung, Beschleunigungskoppelung und Reibungskoppelung (Wied. Ann. 61 p. 151, 1897). Die späteren zahlreichen Anwendungen der Koppelungstheorie fallen schon außerhalb der Zeitepoche, welche diesem Buche gesteckt ist.

Tönende Flammen. Schon bald nach Entdeckung des Wasserstoffs (brennbare Luft) beobachtete Deluc (Nouv. Idées sur la Meteorol. 1787, deutsche Übersetzung I, p. 138), daß eine solche Flamme, in eine Glasglocke eingeführt, dieselbe alsbald zum Tönen bringt; seine Erklärung ist jedoch verfehlt. Hermstaedt hielt die Wasserstoffflamme in eine oben geschlossene Glasröhre (Crells chem. Ann. I, p. 335, 1793). Tromsdorf benutzte offene Röhren und beobachtete die beim Tönen veränderte Form der Flamme selbst (Erfurter gelehrt. Ztg. 58, p. 457, 1794), aber erst Chladni erklärte die Sache richtig, zeigte auch, daß nicht nur der Grundton der Röhre, sondern bei geeigneter Stärke der Flamme und richtiger Lage in der Röhre ein Oberton erzeugt werde, und zwar bei oben geschlossener Röhre der 1., 3., 5. Oberton, bei offener der 2., 4. usw. Oberton. Er erklärt auch, warum mit einer Kerzenflamme dieses Tönen nicht erreicht werden könne, und nennt eine Zusammenstellung solcher verschieden langer Röhren eine chemische Harmonika (Acustic, 1802). Die Bedingungen für das Tönen sind genauer untersucht vom Grafen Schaffgotsch und als eine Koppelungsschwingung erkannt (Monatsber. d. Akad. Berlin 1857; Pogg. Ann. 100, p. 352, und 101, p. 471, 1857). Eine umfassende Darstellung und Ersetzung des Wasserstoffs durch Leuchtgas lieferte Sondhauß (Pogg. Ann. 109, p. 1 u. 426, 1860), während Zoch die tönende Flamme mit der Zungenpfeife in dem Ansatzrohr verglich (ib. 127, p. 581, 1866).

Mit einfacher Resonanz hat man es bei dem Mittönen freier Flammen, den sogenannten sensitiven Flammen, zu tun, welche von Planeth entdeckt sind (Pogg. Ann. 144, p. 639, 1871).

Im Anschluß an die schon erwähnten Intensitätsmessungen des Schalles durch Kundt hat Raps ein Verfahren mit Schallventilen ausgearbeitet, welches die Druckverhältnisse in einer tönenden Luftsäule sehr exakt zu messen gestattet und damit eine Theorie abgeschlossen, die 60 Jahre lang die Physiker beschäftigte (Wied. Ann. 36, p. 273, 1889). Das ist die Theorie der Orgelpfeifen. In einer ausführlichen Arbeit hatte D. Bernoulli (Mém. Paris 1762, p. 431) die Labialpfeifen behandelt, speziell die gedeckten Pfeifen, aber seine Resultate sind mit der Beobachtung nicht genug übereinstimmend. L. Euler behandelte in der 4. Sekt. der Arbeit De motu Aeris in tubis (Nov. Comm. Petrop. 16, p. 281—425, 1772) die Theorie der offenen Pfeifen. Da er annimmt, daß die Verdichtung am Ende der Röhre = 0 sei, sind auch seine Ergebnisse mit dem Experiment nicht ausreichend übereinstimmend. Um bessere Übereinstimmung zu erzielen, nahm Poisson (Mém. Paris 1817, II, p. 304) an, daß die Verdichtung am Ende der Röhre proportional der Geschwindigkeit sei. Daß diese Annahme unstatthaft sei, hat Helmholtz (s. unten) nachgewiesen. Eine auf sorgfältige Experimente gegründete Theorie der Pfeifen lieferte erst W. Weber (1804—1891) in seiner Dissertation (Halle 1826) und seiner Habilitationsschrift (ib. 1827).

In letzterer wird die Theorie der Zungenpfeifen gegründet, während die erstere auch mit Labialpfeifen zu tun hat. Freilich hatte die praktische Erfahrung der Orgelbauer schon Jahrhunderte früher für die Orgelpfeifen Regeln aufgestellt, deren physikalische Begründung fehlte. Es setzt mit der Weberschen Arbeit erst die Reihe von Untersuchungen ein, durch welche nun auch die Theorie der Pfeifen und Pfeifenklänge gefördert wurde. Zunächst ist für die offenen Pfeifen aus der allgemeinen Theorie der Schwingungen festgestellt, daß beim Anblasen des Grundtons die Länge der Pfeife einer halben Wellenlänge entspricht. Fraglich war nur, wie bei der Labialpfeife die Länge der Röhre zu bestimmen sei; wird dieselbe von dem Ende der Lippe gemessen bis zum oberen Rande der Röhre, so zeigt sich, daß je nach der Weite der Röhre diesem l ein Stück x zugefügt werden muß, so daß die Tonhöhe nicht $n = \frac{c}{2l}$, sondern $\frac{c}{2(l+x)}$ ist. Das hat Dulong experimentell nachgewiesen und x für verschiedene Weiten bestimmt (Ann. de Chim. et de Phys. 41, cf. Pogg. Ann. 16, p. 463, 1829). Aus der Lage der Knotenpunkte in der schwingenden Luftsäule ist dies x ebenfalls berechenbar, wie Hopkins zeigte (Trans. Camb. 5, 1834, cf. Pogg. Ann. 44,

p. 246 u. 603, 1838). Aber bei den offenen Pfeifen kommt eine zweite Korrektur hinzu.

Die Reflexion der Welle findet nicht genau an dem Ende der offenen Pfeife statt, sondern in einem geringen Abstand über dieses Ende hinaus, so daß die Tonhöhe $n = \frac{c}{2(l + x + y)}$ wird, und die Größe dieses y hängt wieder von der Weite der Röhre ab, wie schon Weber beobachtete. Wertheim hat diese Verhältnisse genau auch mit Berücksichtigung des Mundstückes und des Materials der Röhre untersucht (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, 31, 1850). Daß die Wandung der Röhre ebenfalls von Einfluß auf die Tonhöhe ist, und zwar daß bei weicher Wandung eine wesentliche Vertiefung des Tones eintritt, hat bereits Savart an Pergament nachgewiesen (Schweig. Journ. 21, p. 292, 1828).

Bei gedeckten Pfeifen fällt die Korrektur durch das y natürlich weg und die Tonhöhe der gedeckten Pfeife ist für den Grundton $n = \frac{c}{4(l + x)}$, wie Wertheim (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, 23, 1848) nachwies. Die Abhängigkeit der Tonvertiefung durch die Zunahme der Röhrenweite prüfte Liscovius (Pogg. Ann. 58, p. 95, und 60, p. 482, 1843). Da die gedeckte Pfeife am Endpunkt stets einen Knotenpunkt hat, so können in derselben nur die ungeradzahligen Obertöne erregt werden; werden diese erzeugt, so kann man mit einem beweglichen Stempel die Distanz zweier Knoten feststellen. Dieser bewegliche Stempel ist bereits von Daniel Bernoulli (Mém. Paris 1762, p. 431) eingeführt.

Für die durch x und y korrigierte Pfeifenlänge führte Helmholtz die Bezeichnung „reduzierte Länge" ein und entwickelte die ganze Theorie der Pfeifentöne in Crelles Journ. 57, p. 1, 1859. Hierbei findet er die Bedeutung der Intensität des Anblasens für die Tonerzeugung und die durch die Weite der Röhre bedingte verschiedene Schwingungsart, so daß in ganz engen Röhren die Luftschwingungen ähnlich wie die durch gestrichene Saiten erzeugten sich verhalten. Experimentell wurde das Anblasen durch Toepler und Boltzmann (Pogg. Ann. 141, p. 321, 1870) untersucht, während der Schwingungszustand der in engen Röhren erzeugten Töne mit Gasflammen durch Mach und J. Hervert untersucht sind (Pogg. Ann. 147, p. 510, 1872). Über die Klangfarbe der verschieden gebauten Pfeifen der Orgel verweise ich auf Helmholtz' Lehre von den Tonempfindungen, p. 149, 6. Aufl. 1913, besonders auch in bezug auf die Rohrflöte, ein Musterbeispiel gekoppelter Systeme.

Als ein weiteres Beispiel von gekoppelten Schwingungen erweisen sich die Zungenpfeifen, welche zuerst von W. Weber eingehend behandelt sind. Schon in seiner Wellenlehre (l. c., p. 521) zeigt er, daß die schweren Metallzungen den wesentlichsten Einfluß auf die Tonhöhe haben, aber daß durch Ansatzröhren (zylindrische) der Ton vertieft wird. Und zwar wird durch ein zylindrisches Ansatzrohr zunächst der Ton um einen halben Ton, dann bei zunehmender Länge um mehrere Töne vertieft. Ebenso bewirkt eine Verminderung des Querschnitts der Ansatzröhren eine Vertiefung des Tones. In einer Reihe von Arbeiten (Pogg. Ann. 14, p. 327; 16, p. 195 u. 419; 17, p. 193, 1828—1829) gibt Weber eine Theorie der Zungenpfeifen, worin bei solchen schweren Metallzungen das Ansatzrohr zunächst als eine Dämpfung wirkt. Je größer die Länge der Luftsäule wird, um so größer die Belastung der Zunge, sobald aber die Länge der Röhre so groß wird, daß ihr Eigenton dem der schwingenden Zunge gleich wird, so hört die Verminderung auf und der Ton springt wieder auf die ursprüngliche Höhe.

Weber bleibt aber nicht bei schweren Zungenpfeifen stehen, sondern gibt auch eine Theorie der Klarinette, Oboe und des Fagotts. Das sind Instrumente mit weichen Zungen. Bei diesen überwiegt der Schwingungszustand des Rohres und die Zunge dient nur zur Erregung der Tonschwingungen.

Auch bei den konischen Ansatzröhren spielt die Länge eine wesentliche Rolle. Ganz kurze konische Rohre scheinen lediglich als Schallverstärker zu dienen. Geht man der Eigenschwingung entsprechend von einem Tone des Ansatzrohres aus und verkürzt das Rohr, so erhält man höhere Töne, bis zu einer gewissen Grenze, ebenso Vertiefung bei Verlängerung des Rohres. Stimmt der Eigenton des Rohres nicht mit dem Tone der Zunge überein, wohl aber ein Oberton des Rohres, so ertönt dieser Oberton recht kräftig. Die konischen Ansatzröhren sind von Zamminer experimentell untersucht; wenn es sich um vollständige Kegel handelt, sind die Töne den zylindrischen Ansatzröhren gleicher Länge entsprechend; aber in abgestumpften Kegeln tritt eine erhebliche Abweichung ein (Pogg. Ann. 97, p. 211, 1855). Die Theorie ist von Helmholtz entwickelt (Pogg. Ann. 114, p. 326, 1861). Er findet die Bedingungsgleichung tang $\frac{2\pi(l+a)}{\lambda} = -\frac{2\pi r}{\lambda}$, wo r der Abstand der Zunge von der Kegelspitze, l die Länge des Rohres, a der Zusatz zu l zur reduzierten Länge und λ die Wellenlänge des Tones ist. Daß die Helmholtzsche Theorie für konische Ansatzrohre nicht ohne

Einschränkung anwendbar ist, daß vielmehr je nach der Form und Länge des Ansatzrohres wesentliche Abänderungen eintreten, ist von mir gezeigt (Ann. d. Phys. 39, p. 677, 1912).

Helmholtz beschäftigt sich jedoch wesentlich nur mit weichen Zungen, wobei der Grundton der Zunge keinen wesentlichen Einfluß hat, sondern nur als Erreger für die Luftschwingungen und die Röhre in Betracht kommt. Auch die Blechblaseinstrumente werden als Zungenpfeifen behandelt, da die Lippen hier die Zungen darstellen, deren Elastizität Öffnen und Schließen für den Luftstrom erzeugt. Die Schwingungen der Lippen hängen dann wesentlich vom Druck ab, mit welchem sie gespannt werden. Die Tonreihe der Hörner ist ausführlich von Zamminer (1817—1858) untersucht und die Tonfolge eines Es-Horns bestimmt. Er stellt dabei die Bedeutung des offenen Endes fest; er zeigt, daß die hineingesteckte Faust die Tonhöhe herabsetzt, so daß die nicht reinen Obertöne auf die richtige Schwingungszahl kommen (Pogg. Ann. 97, p. 173 u. 211, 1855, und ausführlich in „Die Musik und die musikalischen Instrumente“, Gießen 1855).

Schwingungszahlmessung.

Um die Schwingnugszahl eines Tones direkt zu messen, bediente man sich der Sirene. Die Form, welche der vollkommendsten Ausbildung fähig war, ist zuerst erfunden. Cagniard de la Tour hat auf einen Windkasten, welcher durch eine horizontale Scheibe, die auf einem Kreise 12 schräg eingeschnittene Löcher hatte, abgeschlossen war, eine drehbare Scheibe mit gleicher Lochzahl, worin die Löcher in entgegengesetzter Neigung gebohrt waren, so daß die Wandungen der Löcher in der festen und beweglichen Scheibe einen rechten Winkel miteinander bildeten, aufgesetzt. Der aus dem Windkasten austretende Luftstrom dreht daher die bewegliche Scheibe selbst. Die Anzahl der Drehungen wurde durch eine Schraube ohne Ende auf ein Zählwerk übertragen. So zählt man die Anzahl Druckstöße, welche den Ton der Sirene erzeugen, bei n Rotationen in der Sekunde als $12n$ (Pogg. Ann. 8, p. 456, 1826). Von Dove wurde diese Sirene dahin verbessert, daß die Scheiben vier Lochkränze erhielten, so daß sie einen Durakkord geben mit dem Verhältnis 8 : 10 : 12 : 16 (Pogg. Ann. 82, p. 596, 1851). Helmholtz erweiterte diese Sirene zu einer Doppelsirene, wobei die obere Scheibe durch Drehung des ganzen oberen Windkastens mittels einer von Hand gedrehten Kurbel gegen die untere um eine Anzahl

Schwebungen verstellt werden kann (Lehre von den Tonempfindungen, 1. Aufl. 1863, p. 270). Endlich fügte er zur Konstanthaltung der Tonhöhe noch einen Elektromotor hinzu (Wien. Ber. 58, II, Okt. 1868).

Sehr viel einfacher ist die Kartensirene von Savart (Pogg. Ann. 20, p. 294, 1830). Eine Karte wird in die Zähne eines rotierenden Zahnrades gehalten; ist n die Anzahl der Zähne, p die Anzahl der Umdrehungen, dann ist $n \cdot p$ die Tonhöhe.

A. Seebeck drehte mit einem Schnurlauf eine Scheibe, die in einem Kranze n Löcher hatte, und blies aus einem Rohre durch diese Löcher Wind; ist p die Anzahl der Rotationen, so ist $n \cdot p =$ Tonhöhe (Pogg. Ann. 53, p. 417, und 59, p. 515, 1841/43).

Um auch für Töne von transversal schwingenden Körpern direkt die Schwingungszahlen zu bestimmen, wandte Duhamel wohl zuerst die graphische Methode an, indem eine an dem schwingenden Stabe angebrachte Spitze auf berußter, bewegter Platte oder einem gedrehten Zylinder die Kurve zeichnete (Mém. de l'Inst. 1840, p. 19), während Lissajous (1822—1880) das Vibrationsmikroskop erfand (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, 51, 1857 und C. R. 44, p. 727, und 45, p. 48, 1857).

Für angeblasene Hohlräume hat Sondhauß experimentell die Tonhöhe des Grundtons bestimmt in der Beziehung $n = 52400 \frac{\sqrt[4]{s}}{\sqrt{S}}$, wo s der Flächeninhalt der Öffnung, S das Volumen des Hohlraumes ist. Die Formel $a \sqrt[4]{s} / \sqrt{S}$ ist auch theoretisch von Helmholtz bestätigt (Pogg. Ann. 81, p. 235 u. 347, 1850).

Um den Schwingungszustand der Luft in einer Pfeife direkt zu beobachten, hat R. König eine sinnreiche Methode angegeben, welche sowohl die Beobachtung der Intensität und Tonhöhe durch das Ohr, wie auch mit Hilfe der Manometerflamme und rotierendem Spiegel die Schwingungskurve selbst an jeder beliebigen Stelle der Pfeife aufzunehmen gestattet (Wied. Ann. 13, p. 569, 1881). Eine rein optische Methode ist von Boltzmann vorgeschlagen und von ihm in Verbindung mit Töpler ausgeführt (Pogg. Ann. 141, p. 321, 1870). Die Strahlen ein und derselben intermittierenden Lichtquelle werden zur Hälfte durch ruhende, zur Hälfte durch schwingende Luft geleitet und zur Interferenz gebracht. Da durch die Schwingung der Luft der Lichtstrahl bald Verzögerung, bald Beschleunigung erfährt, werden die Interferenzstreifen schwingende Bewegung bekommen. Auf Anregung dieser Arbeit hat dann A. Raps eine Methode aus-

gearbeitet, die die Interferenzstreifen auf einen mit photographischem Papier überzogenen Zylinder direkt zu photographieren und so die Knotenpunkte in den Pfeifen sehr scharf zu bestimmen gestattet. Die Methode ist angewandt auf Labialpfeifen, sowohl gedeckte wie offene, und auch auf Zungenpfeifen mit einigen Abänderungen. Es gelang auch, die gleiche Methode für Schwingungen in freier Luft anzuwenden und damit die Vokalklänge zu analysieren (Wied. Ann. 50, p. 193, 1893; s. unten).

Sprache.

Die menschliche Sprache ist schon im Altertum Gegenstand der Betrachtung gewesen, doch meistens nur vom ästhetischen Standpunkt aus. Jedoch findet sich bei Platon in den Gesetzen die Andeutung, daß die Sprache auch zu betrachten ist nach den Gesetzen der Harmonie und daß die Laute sich nach der Vereinigung von hohen und tiefen Tönen unterscheiden. Vielleicht kann man vermuten, daß Platon darin die Vokale durch solche Kombination von hohen Tönen (Obertönen) unterscheiden wollte.

Daß Vokale und Konsonanten sich so unterscheiden, daß erstere Töne, letztere Geräusche sind, ist auch erst sehr spät erkannt und zum Bewußtsein gekommen. Noch Bacon von Verulam gibt in seinem Sylva sylvarum, 1665, p. 782, als tönende Körper an: 1. Metalle und Gläser und ähnliche Körper, 2. Luft, 3. Wasser; daß die menschliche Sprache hierbei nicht unterzubringen ist, daß also die schwingenden Stimmbänder ihm unbekannt sind, darf wohl anerkannt werden. Wohl haben Musikschriftsteller wie Zarlino († 1599) und Werkmeister (1691) den Gesang behandelt, aber physikalisch ist nichts dabei untersucht.

Erst als man anfing, den Klang zu analysieren, wie oben auseinandergesetzt ist, trat auch das Bedürfnis hervor, die Vokalklänge zu betrachten. Schon bei Samuel Reyher findet sich (1619, Mathesis mosaika) die Bemerkung, daß man bei einem Klange nicht nur den Grundton, sondern auch höhere Töne (Obertöne) hört. Diese Fähigkeit des menschlichen Ohres, aus einem Klange die einfachen Sinusschwingungen herauszunehmen, ist später von G. S. Ohm als ein Gesetz ausgesprochen, daß das menschliche Ohr nur eine pendelartige Schwingung der Luft als einfachen Ton empfinde und jede andere periodische Schwingung in eine Reihe pendelartiger Schwingungen zerlegt und als Töne empfindet (Pogg.

Ann. 59, p. 513, 1843, und 62, p. 1, 1844). Bei Rameau finden wir nun eine Anwendung des Reyherschen Gedankens auf die Vokale. Er gibt folgende Anweisung (Nouv. Système de Musique théor., 1726, Vorrede): Wenn der Vokal o auf den Ton es gesungen wird und man dann auf den Klavier b′ anschlägt, so wird man, nachdem die Taste wieder freigelassen ist, also die Saite aufhört zu schwingen, den Ton b′ solange mithören, als der Sänger sein o singt. Nimmt man statt der Duodezime den fünften Oberton g″, so wird man das gleiche hören, wenn der Sänger statt o ein a singt. Das ist der erste Ansatz zur Vokalanalyse, aber es sind viele Jahrzehnte vergangen, ehe die Sache weiteruntersucht wurde. Das kommt wohl daher, daß freilich das menschliche Ohr die Klänge analysiert, aber es gehört doch einige Übung dazu, mit unbewaffnetem Ohre die höheren Obertöne herauszuhören. Man muß sich erst dazu trainieren mit Resonatoren, bis man die Obertöne deutlich hört. Darum setzt die systematische Unterscheidung der Vokale erst ein, nachdem die Resonatoren erfunden waren.

Zunächst zeigt Du Bois-Reymond (Norddeutsche Ztschr. 1812), daß die Vokale in drei Gruppen zerfallen: a, o, u; a, ö, ü; a, e, i, indem alle aus a abgeleitet werden. Ihm schwebt bereits vor Augen, was Wheatstone zuerst aussprach, daß die Vokale nur durch die mitklingenden Obertöne voneinander unterschieden werden (London and Westminster Review, Oct. 1837). Willis hatte den Versuch gemacht (Pogg. Ann. 24, p. 397, 1832), durch Zungenpfeifen die Vokalklänge zu erzeugen. In der Tat ist der Sprechapparat des Menschen dargestellt durch die weichen Zungen der Stimmbänder mit Ansatzröhre des Mundes und der Rachenhöhle. Ausführlich sind diese Versuche mit Erfolg dann von Helmholtz (Pogg. Ann. 108, p. 280, 1859) aufgenommen, nachdem er schon in einem Briefe an Donders (Arch. f. d. holländ. Beiträge I, p. 354, 1857) die Tatsache ausgesprochen hatte. Er gibt die Töne an, welche die Vokale darstellen und beweist das durch das Ansprechen der Resonatoren. Anfängliche Unvollständigkeit in dieser Darstellung, welche zu einer Kritik von E. von Qvanten (Pogg. Ann. 154, p. 272 u. 522, 1875) geführt hatte, hat Helmholtz in den späteren Auflagen seiner Lehre von den Tonempfindungen, 6. Aufl. 1913, p. 168—193, ergänzt. Daß die Form der Mundhöhle beim Aussprechen der einzelnen Vokale sehr verschiedene Eigentöne besitzt, war zuerst von Donders nachgewiesen (l. c., p. 157). Nachdem zunächst durch die Resonatoren die für die Klangfarbe der einzelnen Vokale notwendigen Obertöne gefunden waren, gelang

es auch Helmholtz, durch Anblasen von Flaschen die Vokalklänge objektiv darzustellen, oder auch durch Zungenpfeifen mit aufgesetzten Resonatoren nach Art der Willisschen Darstellung. Die von Willis gefundenen Tonhöhen stimmen mit Ausnahme von e und i mit den Helmholtzschen Resultaten überein. Daß die Eigentöne der Mundhöhle für einzelne Vokale verschieden sind, war in unvollständiger Weise schon von Reyher (l. c.), von Hellwag in seiner Tübinger Dissertation 1780 und von Flörke in Neue Berl. Monatsschr., Sept. 1803 u. Febr. 1804, aufgefunden.

Neben der Untersuchung durch Resonatoren ist von R. König die Methode der im rotierenden Spiegel erzeugten Flammenbilder seiner Manometerkapseln erfolgreich angewendet (Pogg. Ann. 146, p. 176, 1872). Für die Vokale e und i sind die Bilder wegen der sehr hohen Obertöne nicht so charakteristisch wie für die übrigen.

Die Helmholtzsche Theorie der Vokalklänge ist von H. Graßmann (Wied. Ann. 1, p. 606, 1876) abgelehnt und hauptsächlich die Benutzung der Resonatoren als unzuverlässig bezeichnet. Graßmann hält die Vokale für wesentlich kompliziertere Klänge (Akkorde), die vom Ohre in ihrer Gesamtheit aufgenommen werden, mit Ausnahme der Vokale u, ü, i, die nur einen bestimmten Oberton mitklingen lassen. Der wesentliche Gegensatz gegen Helmholtz ist der, daß letzterer für die Vokale fest bestimmte Tonhöhen fordert, während Graßmann nur festes Schwingungsverhältnis zum Grundton fordert. Gegen die Helmholtzsche Forderung hat sich auch Graham Bell (Journ. of Othology 1, p. 173, 1879) gewandt mit Untersuchungen am Phonographen. Mit einem ähnlichen Apparat untersuchen Jenkin und Ewing (Trans. Roy. Soc. Edinb. 28, p. 1) die Vokalklänge und bestätigen im wesentlichen die Graßmannsche Theorie. Auch Schneebeli findet mit seinem Phonautographen (Arch. des Sciences phys., Zürich, 3. Ser., 1, p. 1) Resultate, welche der Graßmannschen Theorie entsprechen. Eine weitere Bestätigung findet dann in einer ausführlichen Untersuchung der aufgenommenen Kurven der Vokalklänge mit Hilfe Fourierscher Reihen J. Lahr (Wied. Ann. 27, p. 94, 1886). Auch die Resultate von A. Raps sprachen dafür, daß es nicht absolut feste Töne sind, welche den Vokalklang bestimmen, sondern feste Schwingungsverhältnisse. Die verschiedenen Formen der Mundhöhle bei den Vokalen bewirken dann das Mitklingen bestimmter Obertöne, die nicht dem Eigenton zu entsprechen brauchen, da die weiche Begrenzung und die kurze Länge des Raumes eine starke Dämpfung bewirken (Wied. Ann. 50,

p. 193, 1893). Auch fand Lord Kelvin bei verstimmten Stimmgabelintervallen von Oktaven einen Einfluß der Phase (Proc. of the Roy. Soc. of Edinb. 9, p. 602, 1878). Zu dem gleichen Resultat kam R. König bei Untersuchungen mit seiner Wellensirene, d. h. beim Anblasen des Randes einer rotierenden Blechscheibe, deren Rand in Sinuskurven ausgeschnitten ist. Er setzt dabei voraus, daß die Luftschwingungen dann auch einfache Sinusschwingungen seien (Wied. Ann. 14, p. 369, 1881, und 57, p. 339 und 555, 1896). Diese Voraussetzung ist sehr unwahrscheinlich, da beim Anblasen an der Begrenzung sicher auch hohe Obertöne (Schneidentöne) entstehen. Diese Methode hat Stumpf (ib. 57, p. 677, 1896) wiederholt und starke Verschiedenheiten bei den Obertönen nachgewiesen.

Inzwischen waren von L. Hermann mit dem Phonographen durch Umkehrung der Tonerregung zeitlich und räumlich die Unabhängigkeit der Klangfarbe von der Phase nachgewiesen (Wied. Ann. 58, p. 391, 1896). Das gleiche Resultat fand Lindig mit der Karstenschen Telephonsirene (s. Schrift. d. nat. Ver. 3, p. 27, Kiel 1879), nämlich, daß außer durch Interferenz von Obertönen Klangfarbenunterschiede bei verschiedener Phasenstellung nicht auftreten (Ann. d. Phys. 10, p. 242, 1903). Durch neuere Versuche, besonders durch Umwandlung der Tonschwingungen in elektrische, ist die Meßmethode so verfeinert, daß die Helmholtzsche Vokalanalyse im wesentlichen bestätigt ist, daß also die verschiedenen Vokale durch bestimmte Tonhöhen, welche von Hermann als Formanten bezeichnet wurden, charakterisiert sind. Vor allem hat in letzter Zeit die Untersuchung von Wagner ergeben, daß die Formanten eine in engen Grenzen schwankende Tonhöhe haben, so daß diese bisweilen niedriger ist als der angegebene Ton.

Das Ohr.

Wir übergehen die physiologischen Untersuchungen und beschäftigen uns nur mit den rein physikalischen Fragen. Als eine der ersten Aufgaben über die physikalischen Eigenschaften des Ohres, welche die Physiker interessierte, erwähne ich die Bestimmung der Grenzen der Hörbarkeit für höchste und tiefste Töne. Der erste, welcher solche Grenzen zu bestimmen suchte, scheint Sauveur (1653—1716) (Hist. de l'acad. Paris 1700) gewesen zu sein; er gab als tiefsten Ton 25 Schwingungen, als höchsten 12800 an bei Pfeifen. Eulers (Tentamen nov. theor. mus. Petrop. 1739) Angaben sind für

den tiefsten Ton 20—30 Schwingungen, für den höchsten 4000—7520, je nach der Erzeugungsart. Gegen die tiefsten Töne wendet sich Wollaston (Phil. Trans. 1820), sie seien überhaupt nicht scharf bestimmbar. Savart (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. II, 47, 1831, und 69, 1838) will die untere Grenze mit 16 Schwingungen bestimmen; dagegen erklärt Despretz (C. R. 20, 1845) mit Hilfe von Stimmgabeln, daß der Ton mit 32 Schwingungen wohl noch vernehmbar sei, aber nicht scharf bestimmbar; dazu seien etwa 96 Schwingungen notwendig. Ebenso schwankten die Angaben über höchste Töne, bei Wollaston (1766—1828) mit Orgelpfeifen werden 22000, bei Savart (1791—1841) mit Glasstäben 33000, mit gezahnten Rädern 48000 Schwingungen angegeben. Für tiefste Töne geht R. König auf 28, Preyer auf 24 Schwingungen herunter. Es stellte sich jedoch schon bei Euler heraus, daß die Grenzen für verschiedene Beobachter sehr verschieden werden, besonders bei den hohen Tönen, da die Organisation des Ohres bei allen Menschen verschieden ist. Es ist darum nicht verwunderlich, daß so abweichende Resultate bis in die neueste Zeit erhalten wurden. Ich führe nur als Beispiel F. A. Schulze an, der mit der Galtonpfeife als obere Grenze 20000 Schwingungen feststellte, während sich für die Longitudinaltöne einer schwingenden Saite 18360 fand (Ann. d. Phys. 24, p. 785, 1907).

Der Mechanismus des Hörens wird so zustande kommen, daß im Ohre solche elastischen Teile vorhanden sind, welche die Schwingungen der Luft durch Resonanz aufnehmen und den Nervenenden übermitteln. Dies geschieht im Labyrinth und da finden sich in der Tat elastische Organe. Das sind die etwa 4500 Cortischen Fasern der Membrana basilaris, von dem Arzte Corti 1846 entdeckt (Zeitschr. für wissensch. Zoologie 1851, III, p. 109), und die von Max Schultze entdeckten Haare in den Ampullen der drei Bogengänge. Die Übertragung der Schallwellen der Luft auf diese Organe vermitteln das Trommelfell, die Gehörknöchelchen und die Flüssigkeit in dem häutigen Labyrinth. Die grundlegende Untersuchung über die Bedeutung der einzelnen Teile des menschlichen Ohres im Vergleich zu den Ohren der verschiedenen Tierarten hat E. H. Weber (1795—1878) (De aure et auditu hominis et animalium, 1820) geliefert, während die spezielle Aufgabe des Trommelfells und der Gehörknöchelchen von Savart (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. II, 26, p. 5, 1824) behandelt ist.

Nach E. H. Weber kann ein geübtes Ohr noch Töne unterscheiden, die im Schwingungsverhältnis 1000 : 1001 stehen, was

von Cornu und Mercadier (C. R. 68, p. 301, 1869) durch sorgfältige Untersuchungen bestätigt ist. Die Grenze der Hörbarkeit ist eingehend von Töpler und Boltzmann (Pogg. Ann. 141, p. 321, 1870) untersucht. Dabei hat sich ergeben, daß noch Amplituden von 0,00004 mm hörbare Töne geben. Nun ist freilich die Empfindlichkeit des Ohres in den verschiedenen Tonhöhen eine sehr verschiedene. Nach M. Wien (Arch. f. d. ges. Physiol. 92, 1903) liegt das Maximum bei etwa 2000 Schwingungen. Durchschnittlich müßten für den Umfang einer Oktave innerhalb der sieben Oktaven musikalisch gebrauchter Töne etwa 600 Cortische Fasern vorhanden sein. Um die oben angegebene Webersche Empfindlichkeit dabei zu erklären, nimmt Helmholtz an, daß nicht die einzelne Cortische Faser schwingt, sondern die benachbarten mitschwingen, und aus der Intensität dieser mitschwingenden würde dann im Empfangsorgan die richtige Empfindung der Tonhöhe entstehen (Tonempfind., 6. Aufl., p. 242).

Aus dieser Auffassung ergibt sich dann auch die Erklärung der Konsonanz und Dissonanz. Der erste, welcher auch hier eine physikalisch-mathematische Erklärung lieferte, war wieder L. Euler in seinem Tentamen. Euler sieht das Wohlgefallen an einer Harmonie in der Erkenntnis des einfachen Tonhöheverhältnisses, so daß man bei dem Verhältnis 1 : 2, 1 : 3, usw. die Einfachheit der Ordnung als wohltuend empfinde, und je komplizierter das Schwingungsverhältnis sei, um so geringer das Wohlbefinden. Dementsprechend teilt er die Intervalle in Stufenfolgen und daraus die Dreiklänge. Ein so zahlentheoretisch veranlagter Kopf wird in der Tat durch solche Erklärung befriedigt sein, aber dem gewöhnlichen Sterblichen wird beim Durdreiklang schwerlich das Schwingungsverhältnis zum Bewußtsein kommen. Tartini (1692 bis 1770, Traité de l'Harmonie, 1754) gründet die Konsonanz auf die Kombinationstöne, welche wieder auf Konsonanzen führen. d'Alembert (Elément de Mus., 1762) sieht die Konsonanz in dem Zusammenfallen der ersten Obertöne der Elemente des Zwei- und Dreiklanges. Beide Methoden vereinigt Helmholtz (l. c., p. 310) und sieht die Ursache der Dissonanz in dem Entstehen von Schwebungen. Dieselben brauchen sich nicht auf die Grundtöne zu beziehen, sondern können auch von den Obertönen herrühren, und aus der Intensität dieser Störungen ergibt sich der Grad der Dissonanz.

2. Die Wärme.

Älteste Zeit.

Die Wärmetechnik ist uralt; die Erfindung des Feuers ist wohl die erste Erfindung der Menschen gewesen, und zwar nicht nur als Wärmequelle für frierende Menschen, sondern auch zur Bearbeitung der Nahrung, der Metallgewinnung und Verarbeitung. Zeugnisse dieser Technik reichen bis etwa 6000 Jahre vor Christus zurück. Ob mit dieser sehr ausgedehnten Technik auch eine entsprechende Lehre verbunden war, wissen wir nicht; es ist wahrscheinlich und wir hoffen, daß uns die Herausgabe schon gefundener Tontafeln und neue Funde Gewißheit geben wird. Auch die Chinesen hatten eine alte Wärmetechnik, ob selbständig entwickelt, ist fraglich, aber zurzeit nicht nachweisbar. Es ist wahrscheinlich, daß die Erfindung des Feuers und der darauf beruhenden Technik an verschiedenen (vielen) Punkten der Erde gemacht ist und daher auch eine verschiedene Entwicklung durchlaufen hat. Daß aber ein Austausch der Entwicklungsresultate stattgefunden hat, ist für Ägypten und Babylon nachweisbar, auch für Ägypten und die Bewohner der Atlantis (Westafrika), welche als Erfinder des Messings uns durch Platon überliefert sind (Kritias, p. 116). Aber von einer Wärmelehre wissen wir z. Z. trotz aller dieser technischen Leistungen gar nichts, da die Quellen fehlen. Eine Lehre von der Wärme tritt erst mit den Griechen ein.

Die philosophischen Spekulationen der Jonier interessieren uns im einzelnen auch nicht, da wir sie nur aus Bruchstücken späterer Zitate mit mehr oder weniger Geschick zusammensetzen könnten. Nur das Eine haben sie alle gemeinsam, daß sie die Wärme mit dem Feuer, wenn nicht gänzlich identifizieren, so doch fest verbinden, so daß Wärme immer nur da ist, wo das Element Feuer ist; und als Dritter im Bunde erschien ihnen das Licht, so daß man Licht als „feurige Ausflüsse“ aus dem leuchtenden Körper, also bei Sehstrahlen aus den Augen betrachtete.

Erst bei Platon finden wir eine Trennung zwischen Wärme und Feuer. Im Philebos 25 setzt Platon auseinander, daß zwischen warm und kalt keine Grenze bestehe, es sind relative Urteile. Er gibt keinen absolut warmen oder kalten Körper. Ein Körper wird durch das Eindringen des Feuers (viertes Element, neben Luft, Wasser und Erde) erwärmt, dann wird er leichtflüssig und bei weiterer Zufuhr von Wärme wird er Luft (nämlich luftartig). Durch

die Erwärmung werden die Körper leichter. Die warme Luft steigt auf, ebenso der Dampf. Wird das Feuer entfernt, so tritt Abkühlung ein; dann drückt die kalte Luft auf das Wasser und dies wird bei zunehmender Entfernung des Feuers erstarren. Am leichtesten zeigt sich das bei dem in die Atmosphäre eingedrungenen Wasserdampf, der durch den Luftdruck dann sogar fest werden kann als Hagel. Bei der Berührung mit der abgekühlten Erde wird der Dampf zu Tau oder bei stärkerer Abkühlung zu Reif. — Im Timaios 58—60 behandelt er dann die tierische Wärme. Jeder lebende Körper hat seine Wärmequelle im Blute; dies führt durch die Adern den einzelnen Teilen des Körpers die Wärme zu. Die rote Farbe des Blutes entsteht durch das Eindringen des Feuers (als Element) und durch diese Verbrennung entsteht die Blutwärme (vgl. Theätet II, 116, Ausg. v. Müller & Steinhart 1850—1873). Im Kratylos II, 617 sagt Platon: Licht und Wärme geht in dem Feuer von der Sonne aus, aber Wärme wird auch erzeugt durch Reibung und Bewegung.

Außer Platon sollen nach Angabe des Aristoteles auch Leukippos und Demokrit die Aggregatzustände richtig erkannt haben. Aristoteles selbst hat die guten Anfänge, welche sich bei Platon finden, nicht weitergeführt, vielmehr sich immer tiefer in fundamentalen Gegensatz zu Platon hineingearbeitet, weil er auch die physikalischen Probleme nur dialektisch zu behandeln sucht. Obwohl er an vielen Stellen angibt, daß durch Bewegung Wärme erzeugt wird, so daß verschiedene Philosophen behaupten, Aristoteles habe die Wärme als eine Molekularbewegung angesehen, so sagt er doch ausdrücklich (Metaphys. XI, 11), daß das Wesen der Wärme nicht Bewegung sei, sondern durch die Bewegung werde nur Erwärmung erzeugt. Er stellt dialektisch die vier Gegensätze: kalt — warm, feucht — trocken als die charakteristischen Fundamentalbegriffe auf, aus welchen die vier Elemente erklärbar sind, nämlich: kalt und trocken = Erde; kalt und feucht = Wasser; warm und feucht = Luft; warm und trocken = Feuer. Darum ist auch die Quinta essentia, der Äther, welchen er einführt, nicht ein Baustein der Weltkörper, sondern ein nicht materieller, unveränderlicher Körper mit unveränderlicher Kreisbewegung (Meteorol. I, 4), der weder schwer noch leicht ist (De caelo I). Das Feuer hat keine Schwere (Nic. Ethik II, 1), darum ist sein natürlicher Ort oberhalb der Luft und reicht bis zum Monde (Meteorol. I, 14), oberhalb von ihm ist nur Äther. Die Sterne sind an sich nicht heiß, sondern sie erregen den Äther, der durch seine Be-

wegung Wärme erzeugt (Meteorol. I, 19). Aus rein dialektischen Gründen verwirft Aristoteles an sich richtige Sätze; z. B. erklärt er (Topik IV, 5), Schnee ist nicht gefrorenes Wasser; denn er ist kein Wasser. Anderes, was schon richtig erkannt war, erklärt er falsch, z. B.: Beim Atmen dient die Luft zur Abkühlung des Blutes (Parv. nat. VII, 5, 6, 15, 16); oder: Beim Schröpfkopf bewirkt das Feuer das Anhaften direkt (Rhetorik III, 2); denn das Feuer macht die Luft dichter (!) (Zeugung V, 91). Aristoteles' Lehre bedeutet also mehr einen Rückschritt, statt einer Weiterbildung.

Der Fortschritt findet sich erst bei einem auf Platonische Philosophie eingestellten Gelehrten, Heron von Alexandrien (etwa 133 v. Chr.). Er übernimmt von Straton (etwa 200 v. Chr.) die Entdeckung der Elastizität der Luft bzw. der Gase und zweitens die Ansicht, daß die Moleküle der Körper sich nicht kontinuierlich aneinanderreihen, sondern Zwischenräume haben, die eventuell auch leer sein können. Diese Gedanken verarbeitet Heron mit Archimedesschen Erklärungen in der theoretischen Einleitung zu seiner Pneumatik. Die Beobachtung, daß, wenn man aus einer Flasche mit enger Öffnung die Luft absaugt, die Flasche nun an der Lippe haftet und dieselbe in die Flasche wegen der entstandenen Luftleere hineinzieht, gibt ihm auch die richtige Erklärung der Schröpfköpfe (p. 8). Durch die Erwärmung dehnt sich die Luft im Schröpfkopf aus, sie wird dünner. Wird nun das Gefäß auf die Haut gesetzt, so zieht die Abkühlung desselben die Haut in den Schröpfkopf hinein. Die Ausdehnung der Luft durch die Wärme hat Heron in weitgehendster Weise erkannt und benutzt sie in der Pneumatik (Opera omn. I, Teubner 1899). Die Sonnenstrahlen erwärmen die Luft über dem Erdboden, diese dehnt sich aus, wird leichter und steigt auf (p. 10). Dadurch wird die Luft in Bewegung gesetzt, indem die benachbarte, nicht so stark erwärmte Luft zuströmt; so entstehen die Winde.[1]) Die Ausdehnung durch die Wärme bezieht sich auf alle Körper, nicht nur auf die Luft. Das Feuer macht durch diese Ausdehnung die dichteren Körper leichter und führt sie in einen dünneren Zustand über. So bildet das Feuer aus dem Wasser den Dampf, der nichts anderes ist als luftartiges

---

[1]) In der Ausgabe bei Teubner hat der Herausgeber Schmidt eine deutsche Übersetzung beigefügt. Es zeigt sich aber, wie notwendig es ist, den griechischen Text selbst zu lesen. Denn an zahlreichen Stellen hat Schmidt nicht genug physikalische Kenntnisse gehabt, um eine richtige Übersetzung zu bieten. So hat er im folgenden gar nicht gemerkt, daß Heron von den Aggregatzuständen redet.

Wasser. Dies verdampfte Wasser wird eben als Tau wieder niederfallen, wenn die Sonne sich abgewendet hat (p. 12). Heron hat also die Veränderung des Aggregatzustandes durch die Wärme erkannt. Die Ausdehnung der Luft durch Erwärmung benutzt Heron zur Arbeitsleistung. Er hebt durch erhitzte Luft, die auf Wasser in einem Behälter drückt, das Wasser in einem Steigrohr bis zum Ausfluß (p. 80). Durch eine geschickte Konstruktion hebt er auch feste Körper und stellt Bewegung fester Körper dar (p. 176). Läßt man die in einem Behälter erhitzte Luft durch feine, rückwärts gebogene, seitliche Arme ausströmen, so rotiert der drehbar aufgestellte Behälter; so erfindet Heron die Heißluftturbine (p. 214). Die Expansion des Wasserdampfes benutzt Heron, um zu zeigen, daß der ausströmende Dampf einen Ball tanzen läßt. Ein Experiment, welches heute noch mit Vorliebe in einigen Instituten gezeigt wird (p. 220). Sowohl ausströmende heiße Luft wie ausströmender Dampf blasen eine Pfeife an (p. 218). Heron stellt die erste Rotationsdampfmaschine her, die Dampfturbine (p. 230), die er richtig als Reaktionsmaschine deutet; nur glaubt er, es sei nötig, daß der Dampf gegen eine feste Wand stoße. Endlich konstruiert Heron ein Thermoskop (p. 224), welches anders eingerichtet ist als das seines Lehrers Philon (im Anhang von Herons Opera I, p. 474, s. unten).

Aus dem Altertum sind nur noch zwei Sachen zu besprechen. Erstens die Erfindung des Dampftopfes, wie er bei Philumenos (etwa 200 n. Chr.) beschrieben wird (Puschmann in Nachträge zu Alexander Trallianis, Berlin 1886, p. 42). Ein irdener Topf mit einem festschließenden Deckel, der auf dem Topfe fest verkittet wird, soll benutzt werden, um höhere Temperatur zur Herstellung von Gelatine zu erzeugen. Zweitens die Frage, ob Archimedes, wie die lateinischen Schriftsteller erzählen, wirklich Brennspiegel konstruiert hat. Dazu ist zu sagen: Weder in Archimedes' Schriften, noch in zuverlässigen griechischen Werken ist dergleichen zu finden; aber uns ist nachweislich sehr vieles von Archimedes verloren, so daß wir die Frage nicht entscheiden können. Sicher haben Archimedes und Apollonios die strahlende Wärme gekannt; denn letzterer hat für Ellipsen, Parabeln usw. die Brennpunkte eingeführt und richtig gedeutet, wenn auch eine dunkle Wärmestrahlung nirgends ausdrücklich erwähnt wird. Die von römischen Schriftstellern erzählten Anwendungen von Brennspiegeln zur Verbrennung römischer Schiffe durch Archimedes sind selbstverständlich erfunden.

Philologen haben Heron zu einem Kompilator stempeln wollen (s. Diels, Berl. Sitz.-Ber. 1893), weil er von Straton und Philon abgeschrieben habe. Das ist ganz unhaltbar. Was Heron von Straton hat, ist oben gesagt; er zitiert „die Philosophen" selbst dabei. Heron zitiert überhaupt stets, was er von Archimedes und Philon und Hipparch übernimmt, sehr im Gegensatz zu den bekannten Abschreibern, die natürlich niemals zitieren. Aber Heron verarbeitet die Anregungen, welche er von diesen Männern übernommen hat, durchaus selbständig. Philon steht ganz auf Aristotelischem Standpunkt von dem natürlichen Orte der Elemente; so erklärt er den noch heute häufig vorgeführten Versuch, eine Kerze unter einem Rezipienten über Wasser brennen zu lassen (l. c., p. 477), wobei dann das Wasser in den Rezipienten steigt, ohne Luftdruck und ohne Elastizität der Luft und ohne Ausdehnung der Luft durch die Erwärmung, sondern ganz im Aristotelischen Sinne meint er, daß die Luft in dem Rezipienten das Wasser zieht, während Heron stets die genannten drei Eigenschaften berücksichtigt.

Renaissance.

Die nun folgenden 1500 Jahre sind für die Wärmelehre völlig unfruchtbar. Der erste, welcher wieder von Wärmestrahlung redet, ist Leonardo da Vinci (1452—1519); aber er kennt die Wärmestrahlung auch nur in Verbindung mit Lichtstrahlen; doch findet er, daß die strahlende Wärme bei der Reflexion von Spiegeln oder bei der Brechung in Wasserkugeln von ihrer Stärke wenig verlieren und jene Körper nicht wesentlich erwärmen kann. Doch ist diese Erweiterung der Erkenntnis erst 1800 bekannt gemacht (s. oben).

Die erste Publikation, welche die Wärmelehre berücksichtigt, ist von Giambatista Porta (1538—1615) in seiner Magia naturalis 1606 gegeben. Es ist die getreue Wiederholung des Heronschen Versuchs, Wasser durch den Dampfdruck zu heben. Es ist auffallend, daß die mir bekannten Historiker der Physik diesen Portaschen Versuch als eine selbständige Erfindung behandeln, obwohl weder an dem Experiment noch an der Erklärung irgend etwas von Heron Abweichendes zu finden ist. Daß Porta die Heronsche Pneumatik gekannt hat, ist zweifellos, da, wie ich oben (S. 23) gezeigt habe, Herons Werke gerade damals die weiteste Verbreitung fanden (s. Porta, Pneumaticorum libri III, 1601, 1606 italienische Übersetzung). Auch Salomon de Caus hat das Heron-

sche Experiment zur Hebung des Wassers benutzt in Raisons des fortes mouvantes, 1615, § 195. Schon vorher ist im sächsischen Bergbau die Heronsche Methode benutzt zum Wasserheben, wie Joh. Mathesius in Sarepta oder die Bergpostille 1562 erwähnt.

Auch andere Heronsche Erfindungen wurden um diese Zeit wiederholt. So soll Blasco de Garay 1543 im Hafen von Barcelona ein Schiff durch ausströmenden Dampf (Aeolipile) getrieben haben (s. Rob. Stuart, Historical and descriptive anecdotes of steam engines, London, 1829). Auch Cardano beschreibt die Aeolipile in De varietate rerum, Basil. 1557, ebenso Giovanni Branca in Le machine artificiose, Rom 1629. Das einzig Neue in dieser Zeit war die in dem anonym erschienenen L'art et science de trouver les eaux, 1569, gegebene Bemerkung, daß 1 Maß Wasser 10 Maß Dampf geben (d'air), womit zum ersten Male, wenn auch mit unrichtigem Resultat, der Versuch gemacht wird, eine gesättigte Dampfmenge festzustellen.

Das Thermometer.

Die Erfindung des Thermoskops spielt in allen Geschichten der Physik eine große Rolle. Als Erfinder werden genannt: Porta, Galilei, Santorius, Sarpi, Drebbel, Fludd oder gar Baco, und es werden dann lange Auseinandersetzungen angefügt, um den Preisträger herauszufinden. Nach dem Vorgange von Poggendorff kommen einige sogar zu dem Schlusse, Galilei habe 1597 das Thermometer erfunden! Erfunden haben das Thermoskop Philon und Heron. Das Philonsche Thermoskop (l. c., p. 474) besteht aus einer größeren Bleihohlkugel, in welche ein zweimal rechtwinklig gebogenes Glasrohr mit dem einen Schenkel luftdicht eingelassen bis nahe auf den Boden der Kugel hineinragt; der andere Schenkel taucht in ein offenes Gefäß mit Wasser ebenfalls bis nahe auf den Boden. Wird dieser Apparat in die Strahlen der Sonne gestellt, so dehnt sich die Luft in der Bleikugel aus und entweicht durch das Wasser im offenen Gefäß in Form von Luftblasen; stellt man den Apparat dann in den Schatten, so kühlt sich die Luft in der Kugel ab und das Wasser steigt in das Glasrohr, je nach dem Grade der Abkühlung bis zum Überlaufen in die Bleikugel. Aus dieser wird es bei erneuter Erwärmung durch die sich wieder ausdehnende Luft in den offenen Behälter zurückgedrückt. Die Unhandlichkeit dieses Apparates beseitigte Heron (l. c., p. 224), indem er einen festen Apparat baute. Auf einen mit Wasser ge-

füllten Kasten, der durch ein Loch mit der Luft kommuniziert, setzt er eine halb mit Wasser gefüllte Kugel, welche durch ein Rohr mit dem unteren Kasten verbunden ist; dies Rohr ragt bis nahe an den Boden des Kastens und oben bis nahe an die Kugelhülle in den Luftraum der Kugel. In diese Kugel ist luftdicht von oben ein Heberarm bis nahe an den unteren Rand der Kugel eingelassen. Wird die Kugel stark erwärmt, so drückt die Luft in der oberen Hälfte der Kugel Wasser in den Heber und dies tröpfelt eventuell aus in einen in dem Loche des Kastens steckenden Trichter, der das ausfließende Wasser dem unteren Kasten wieder zuführt. Bei Abkühlung drückt der Luftdruck das Wasser aus dem Kasten wieder in die Kugel. Der Apparat diente dann durch Beobachtung der Stellung der Wassersäule in dem horizontalen Heberteile zur Temperaturvergleichung. Diese beiden Apparate waren seit 1575 durch Commandino in ganz Italien bekannt. Das einzig Neue an den ersten italienischen Apparaten war, daß man den Heber des Philonschen Apparates, nachdem eine kleine Wassersäule in das Heberrohr eingedrungen war, aus dem Wasserbehälter herausnahm; man hatte dann ein sehr empfindliches Luftthermoskop, welches freilich auch vom veränderlichen Luftdruck abhängig war. So beschreibt Porta in Pneumaticorum libri III, italienische Ausgabe von 1606, das Thermoskop. Santorio, der venetianische Professor der Medizin, sagt in seinem Commentaria in artem medicinalem Galeni 1612 ausdrücklich, daß sein Thermometer von Heron stamme. Er hat aber das Verdienst, dies Thermometer zuerst angewandt zu haben, um Fieber damit festzustellen. Tatsächlich war sein Thermometer das Philonsche, nur mit der Abänderung, daß er einfach eine mit langem engen Rohr versehene Glaskugel erwärmt in das Wasser tauchte und so bei Abkühlung einen Wasserfaden in das enge Rohr brachte und auf dem Rohre nun eine willkürliche Teilung durch aufgesetzte Glasperlen anbrachte. Cornelius Drebbel beschreibt in seinem: Ein kurzer Traktat von der Natur der Elemente, B. IV, 1608, das Philonsche Thermoskop mit der angezeigten Abänderung. Fludd sagt (Phil. Moysaica I, Lib. 1, cap. II, 1638), daß das Thermoskop keine neue Erfindung sei; er habe dasselbe in einer 500 Jahre alten Handschrift (wahrscheinlich einer arabischen) gefunden. Telioux beschreibt in Mathematica maravigliosa, Rom 1611, das Philonsche Thermoskop als von Heron herrührend, mit der Abänderung, daß das Rohr der gläsernen Hohlkugel mit dem Wasserbehälter fest verbunden war (nicht luftdicht) und daß auf demselben eine Skala

mit acht willkürlichen Hauptteilen und 60 Unterteilungen angebracht war.

Was nun endlich Galilei angeht, so hat er nie etwas über das Thermometer veröffentlicht, auch in Briefen niemals behauptet, er habe ein Thermometer erfunden, und er hat doch seine sonstigen Erfindungen sehr energisch zu wahren gewußt. Erst seine Biographen behaupten, er habe das Thermometer erfunden. Viviani sagt, er habe es bald nach seiner Anstellung in Padua 1592 erfunden. Beweise und Quellen gibt er nicht an. Nelli gibt in seiner Lebensbeschreibung 1793, p. 69, einen Brief von P. Castelli an Mons. Cesarini vom 20. 9. 1638, worin Castelli sagt, Galilei habe ihm vor 35 Jahren, also 1603, einen Versuch gezeigt, daß Galilei eine Glaskugel von der Größe eines Hühnereies mit einer Röhre von Strohhalmdicke in der Hand erwärmt habe und das Rohr in Wasser getaucht habe. Beim Abkühlen sei das Wasser um eine Spanne in das Rohr gestiegen. Das ist also genau der Philonsche Versuch! Das sind die Quellen, aus welchen man Galileis „Erfindung“ ableiten will! Im Jahre 1613 am 9. 5. schreibt der Arzt Sagredo von Venedig an Galilei, daß er mit einem ähnlichen Apparat als Thermometer die Fieberhöhe messe und sich freuen würde, auch einmal Galileis Konstruktion kennenzulernen. Derselbe beschreibt in einem Briefe vom 7. 2. 1615 ein Thermometer mit einer Skala, die von einer Kältemischung Schnee und Salz ausgeht (Comment. epist. III, p. 375). Ein ganz ähnliches Thermometer benutzte auch van Helmont (1572—1644) in dem posthumen Werke Ortus medicinae 1648. — Galilei war auch kaum geeignet, ein Thermometer zu erfinden; denn in bezug auf die Wärmelehre stand er ganz auf dem Boden des Telesius (1508—1588), De rerum natura, 1565, der aus drei Prinzipien, den beiden aktiven: Wärme und Kälte, und dem leidenden, die Materie, die Welt aufbauen wollte. — Das einzig Feststehende ist also dies: Gegen Ende des 16. Jahrhunderts war überall, in Italien ganz besonders, Herons Pneumatik verbreitet. Die darin gegebene Anweisung für ein Thermoskop regte überall zur Nachkonstruktion von Thermometern um das Jahr 1600 an; unter diesen Konstrukteuren war auch Galilei, und diese ersten Thermometer sind sämtlich nicht über das Philonsche Rezept hinausgekommen, es waren offene Luftthermometer. Freilich behauptet Libri in Galileo Galilei, deutsche Ausgabe 1842, p. 21, daß das erste geschlossene Thermometer 1611 in Rom erwähnt sei, aber er sagt nicht, wo das steht und von wem es konstruiert sei; jedenfalls steht es nicht in dem obenerwähnten Buche von Telioux,

welches 1611 in Rom erschien und ein Thermoskop, wie oben geschildert, beschreibt. Ich vermute, daß Libri eben dies Thermometer meint, und weil der Wasserbehälter mit dem Rohre fest verbunden war, daselbe für geschlossen ansah, während tatsächlich der Wasserbehälter durch eine Öffnung mit der äußeren Luft in Verbindung war und auch sein mußte, wenn das Instrument funktionieren sollte.

Wahrscheinlich unabhängig von den Italienern hat O. von Guericke (1602—1686) ein Thermobaroskop in großem Maßstabe hergestellt; er beschreibt es in seinem Werke Experimenta nova, welches erst 1672 erschien, aber bereits 1663 druckfertig vorlag. Die Versuche, welche in diesem Werke beschrieben sind, waren aber viel früher gemacht und bekannt geworden; sie sind zum großen Teile von Robert Boyle wiederholt und als von Guericke herrührend anerkannt (New experiments, Physico-Mechanical etc., Oxford 1660), darunter auch dies Thermoskop. Eine kupferne Hohlkugel war mit einer langen, U-förmig gebogenen Röhre verbunden, in welche bis zu halber Höhe Wasser gegossen wurde. In dem offenen Schenkel befand sich ein Schwimmer, der einen Faden trug. Dieser führte über ein Rad oberhalb der Röhre und an dem Faden hing eine Figur, welche mit einem Finger auf eine Skala zeigte, welche die Bezeichnungen trug: Magnum frigus, Aer frigidus, Aer subfrigidus, Aer temperatus, Aer subcalidus, Aer calidus, Magnus calor.

Die weitere Ausbildung des Thermometers ist zunächst von der Accademia del Cimento (1657—1667) in Florenz geleistet. Nach den Angaben aus dem „Diario“ (Supplement zu der Ausgabe der Saggi di naturali esperienze, 1841) hat Ferdinand II. Medici schon 1641 ein oben geschlossenes Weingeistthermometer besessen, 1646 ist ein solches dem Monconys durch Toricelli gezeigt, welches eine Skala von schwarzen Glasknöpfchen auf der weißen Glasröhre hatte. Nach dem Diario hat die Accademia del Cimento auch Quecksilberthermometer hergestellt, dieselben aber wieder verworfen, weil Hg sich weniger als Weingeist ausdehne. Die hauptsächlichsten Experimentatoren der Accademia waren Borelli (1608 bis 1679) und Renaldini (1615—1698), doch werden in den Saggi die Namen der Erfinder nicht genannt. Da Antinori 1829 eine Kiste mit Apparaten der Accademia entdeckte, in welcher auch Thermometer der Accademia vorhanden waren, sind uns die Leistungen der Accademia wohl bekannt (Pogg. Ann. 21, p. 325, 1831). Die Thermometer haben ähnliche Gestalt, wie die modernen Glasthermo-

meter, sind aber nicht ausgekocht vor dem Zuschmelzen. Die Skala ist durch kleine Glasperlen bezeichnet, 50-, 60-, 70- und 100teilig. Beim 50teiligen entspricht 50 dem 44. Grade Réaumurs, 13,5 dem Nullpunkt Réaumurs, so daß sein Nullpunkt der größten Winterkälte, sein Höchstpunkt der höchsten Sommertemperatur Florenz' entsprechen dürfte.

Dalencé war wohl der erste, welcher erklärte, es seien zwei feste Punkte notwendig zur Teilung; er wählt für die Skala (Traité des baromètres, thermomètres etc., Amsterdam 1688) den Gefrierpunkt des Wassers, mit — 10° bezeichnet, und die schmelzende Butter. mit + 10° bezeichnet an seinem Weingeistthermometer. Gefrierpunkt und Siedepunkt des Wassers als feste Punkte wählte zuerst Renaldini (Philos. naturalis III, p. 169, 1694), nachdem Hooke nachgewiesen hatte, daß für alle Körper der Schmelzpunkt und Siedepunkt konstante Temperaturen habe (Phil. Trans. 1668); aber Halley (Phil. Trans. 1693) behauptete, schon 1688 die Siedetemperatur des Wassers als festen Punkt seines Thermometers benutzt zu haben. Nur einen festen Punkt benutzte Boyle (The mecanic. Origin of Heat etc., London 1663), und zwar den Schmelzpunkt des Anisöles mit willkürlicher Skala. J. Newton wählte Leinöl für sein Thermometer und die zwei „festen" Punkte schmelzender Schnee als 0° und Blutwärme = 12° (Optics III, 1704).

Die wesentlichste Förderung verdankt die Thermometrie dem Danziger Fahrenheit (1686—1735). Die erste Veröffentlichung 1713 (Acta Erud.) geschah durch Christian Wolff: Relatio de novo barometri et thermometri genere. Er stellt sowohl Weingeistthermometer wie Quecksilberthermometer her in der noch heute üblichen Form, er kocht die Thermometer aus vor dem Zuschmelzen und hat drei verschiedene Skalen, zuerst die Skala — 90, 0, + 90, mit den beiden festen Punkten — 90 in einer Kältemischung, 0 bei schmelzendem Schnee; dann wählt er 0 bei einer Kältemischung von gleichen Teilen Wasser, Kochsalz und kleinen Eisstücken, 12 bei schmelzendem Eis, 24° bei Blutwärme; endlich 0° Kältemischung, 48° Schmelzpunkt des Eises, 96° Blutwärme. Seit 1714/15 konstruiert er auch Quecksilberthermometer mit der Skala 0° in der Kältemischung, 32° beim Schmelzpunkt des Eises, 96° bei Blutwärme. Diese Skala hat er dann beibehalten und berichtet zusammenfassend über seine Versuche in Experiments concerning the degrees of Heat, Phil. Trans. 1724. Darin auch seine 1721 gemachte Entdeckung des überkühlten Wassers.

Neuerdings hat Kristine Meyer aus den in der Kopenhagener Universitätsbibliothek aufbewahrten Adversaria von Ole Römer (1644—1710) es wahrscheinlich gemacht, daß Fahrenheit die Anregung zu seinem Thermometer von Ole Römer, bei dem er 1708/09 weilte, empfangen hat. Römer hatte nach 1703 für seinen Gebrauch, um Temperaturkorrektionen an seinem Fernrohrkreis und dem Pendel anzubringen, Thermometer mit Quecksilber und den festen Punkten: schmelzenden Schnee und siedendes Wasser konstruiert in der gleichen Form, wie die späteren Fahrenheitschen, auch wandte er schon die Skala an mit dem Nullpunkt bei einer Kältemischung für meteorologische Beobachtungen im Winter 1708/09 (K. Meyer, Temperaturbegrebets Udvikling gennem Tiderne og dets Forhold etc., Köbenhavn 1909, auszugsweise in Arch. f. d. Gesch. d. Naturwiss. u. d. Technik II, 1910).

Die Kältemischungen sind zuerst beschrieben von G. Porta in Magia natur. 1589, B. 20, K. 2, durch Mischung von Schnee und Salpeter hergestellt. Von der Accademia del Cimento sind 1657 folgende Kältemischungen angegeben: Schnee und Kochsalz; Schnee und Weingeist; Schnee, Kochsalz und Weingeist; Schnee und Salpeter; Schnee und Salmiak (Saggi III). Unabhängig davon hat R. Boyle in The mechanical origine of heat and cold, London 1665, Kältemischungen angegeben. Mit Hilfe der Kältemischung wollte J. E. Zeidler auch Quecksilber erstarren lassen und gab die Methode an, welche von J. A. Braun mit Hilfe von Aepinus dann am 14. Dezember 1759 zur Herstellung festen Quecksilbers führte (De admirando frigore artificiale dissertatio, Petersb. 1760, in Nov. Comm. Petrop. 11, p. 302, 1765). Das veranlaßte Blagden (1748 bis 1820, Phil. Trans. 1783, p. 329) die Behauptung aufzustellen, daß alle Körper die drei Aggregatzustände haben können.

In einer sehr ausgedehnten Arbeit beschäftigt sich Réaumur (1683—1757) mit der Thermometrie (Mém. Paris 1730). Da macht er zunächst den Vorschlag (nach dem früheren Vorschlage von Amontons, s. unten), das Volumen des Weingeistes bei der Temperatur des schmelzenden Eises gleich 500 zu setzen und dann die Skala nach Teilen dieses Volumens zu bezeichnen. Zum Schluß aber schlägt er (p. 489) die Skala vor: 1000 für schmelzendes Eis und 1080 für siedendes Wasser. Daraus entstand die Skala von 0—80.

Die 100teilige Skala ist von Celsius (1701—1744) eingeführt (Kongl. Vet. Acad. Handlingar 1742, p. 197 der deutschen Übers.). Doch setzt er 0 an die Stelle des siedenden Wassers und 100° an die Stelle des schmelzenden Eises. Sein Schüler Strömer ver-

tauschte die beiden Fixpunkte (ib., T. VII, p. 166). Aber Linné hat in einem Briefe, über welchen Arago der Akademie berichtete (C. R. 18, p. 1063, 1844), behauptet, daß er (Linné) die hundertteilige Skala erfunden habe (s. Pogg. Ann. 63, p. 122, 1844).

Alle diese Thermometer setzen voraus, daß die Ausdehnung der Flüssigkeit proportional der Wärmezufuhr sei. Das ist nicht richtig (s. unten). Luftthermometer haben diesen Fehler in weiten Grenzen nicht. Das erste Luftdifferentialthermometer ist von Helmont (1577—1644), der, nebenbei bemerkt, zuerst den Namen Gas (Ortus medicin., Amst. 1648, bzw. De flatibus, Opera omn., 1707, p. 398) einführte, konstruiert, aber in unpraktischer Form. Die uns heute noch geläufige Form des Differentialthermometers ist von Joh. Christ. Sturm (1635—1703) erfunden, besonders um die Wärmestrahlung zu messen (Collegium experimentale curiosum, Nürnberg 1685). Leslie, nach welchem das Differentialthermometer gewöhnlich genannt wird, hat dem nichts hinzugefügt; er hat nur den Sturmschen Apparat ohne Zitat benutzt.

Daß die Luftausdehnung nahezu proportional der Wärmezufuhr in weiten Grenzen sei, hat zuerst Amontons erkannt und daher ein Luftthermometer konstruiert, welches als Absperrflüssigkeit nicht wie bei Heron Wasser, sondern Quecksilber hatte. Eine weite Glaskugel ist angeschmolzen an den kurzen Schenkel eines **U**-Rohres und teilweise mit Quecksilber gefüllt; der lange, offene Schenkel des **U**-Rohres überragt das Niveau des Quecksilbers in der Kugel so weit, daß die Quecksilbersäule in demselben, wenn der Apparat in siedendes Wasser gestellt wird, um 45″ höher ist als das Quecksilber in der Kugel bei 28″ Luftdruck, so daß die in der Kugel eingeschlossene Luft unter Druck von 73″ Hg steht. Dann bringt er den Apparat in schmelzenden Schnee und findet, daß die Quecksilbersäule auf 51,5″ steht. Da der Querschnitt des Rohres sich zu dem der Kugel wie 1 : 58 verhält, setzt er das Verhältnis der Druckkräfte gleich dem Verhältnis dieser Höhen (Mém. Paris, 1703). Die Beseitigung der Luftdruckveränderung erreichte Hermann (1678—1733) dadurch, daß er die Röhre bei der höchsten Temperatur zuschmolz, so daß für den Stand der Quecksilbersäule nun nur die Elastizität der Luft in Frage kam. Er führte auch die Korrektur der Temperatur für die Länge der Quecksilbersäule ein (Phoronomia seu de viribus etc., Amst. 1716). Mit einem solchen Apparat führte Balthasar in Nürnberg zuerst meteorologische Beobachtungen durch. Wesentliche Verbesserung führte Gay-Lussac bei seiner Untersuchung über die Ausdehnung der Gase durch (Pogg. Ann. 27,

p. 681, 1833). Ebenso versuchte Weinhold (ib. 149, p. 188, 1873) Verbesserungen, um das Luftthermometer auch für pyrometrische Zwecke zu benutzen. Doch erst Jolly (Jubelbd. Pogg. Ann., p. 97, 1874) gab ihm mit dem beweglichen Lederschlauch zuerst die bekannte Form, so daß die von Amontons angenommene Gleichheit des Volumens für die verschiedenen Temperaturen wirklich erreicht werden kann. Mit diesem Apparat fand dann Jolly den Ausdehnungskoeffizienten der Luft = 0,0036678, der mit dem von Magnus gegebenen Werte identisch ist. Mit diesem bequemen Apparat bestimmte Jolly auch die Ausdehnung anderer Gase.

Thermometer, welche höchste und niedrigste Temperatur festhalten, Maximum- und Minimumthermometer, sind zuerst von Rutherford (1753—1819) durch Kombination eines Quecksilber- mit einem Weingeistthermometer hergestellt. Die Röhren beider sind horizontal, in ersterem schiebt die sich ausdehnende Hg-Säule ein Eisenstückchen vor sich her, in letzterem zieht die sich kontrahierende Weingeistsäule ein Glasstäbchen mit zurück (Trans. Edinb. III, p. 247, 1794). Maximumthermometer von Negrette und Zumbra (Pogg. Ann. 99, p. 336, 1856): Die horizontal umgebogene Röhre hat an der Biegungsstelle einen kleinen eingeschmolzenen Glassplitter, so daß die sich kontrahierende Quecksilbersäule hier abreißt. Geißler ersetzt den Glassplitter durch eine enge Kapillare oberhalb der Kugel ohne Biegung der Röhre; diese Einrichtung haben die modernen Fieberthermometer (Pogg. Ann. 123, p. 657, 1864).

Das erste Minimumthermometer für Tiefseetemperaturmessung konstruierte Hooke (Philos. exper., p. 225) und zeigte es der Roy. Soc. 1691 vor. Six nannte sein Maximal- und Minimalthermometer einen Thermometrographen (1782), dessen Beschreibung Le Maistres im Journ. de chim. 5, p. 150 (de la Methrie) lieferte. In einem doppelt gebogenen Glasrohr, dessen innerer Schenkel geschlossen und mit Alkohol gefüllt war, dessen äußerer offener Schenkel mit Hg gefüllt war, wurden von dem Hg auf beiden Seiten kleine Eisenstäbchen getragen, an deren unterem Ende zwei Schweinsborsten befestigt waren, die durch ihre Reibung an der Glaswand die Stäbchen festhielten in der Lage, wohin die ausgedehnte oder zusammengezogene Quecksilbersäule sie geschoben hatte. Die Zurückführung der Eisenstäbchen besorgte Six mit einem Magneten. Die Idee dieses Sixschen Apparates in Verbindung mit der Geißlerschen Kapillare führte zu dem Maximal- und Minimalthermometer von Kappeller, dessen Patent von Breitenlohner im Österr.

Landwirtsch. Wochenbl. 1882, p. 39, beschrieben ist, und welches sehr sicher arbeitet und in den meisten Instituten vorhanden sein dürfte.

Die falsche Benennung des Sixschen Apparates veranlaßte von Arnim, den ersten wirklichen Thermometrographen zu konstruieren. Ein kleines Quecksilberthermometer ist auf einem sehr leichten Wagebalken horizontal mit einem Gegengewicht für höchste Temperatur ausbalanciert, die Kugel des Thermometers ist dem Drehpunkt zugekehrt; bei Abkühlung hebt sich der Wagearm mit dem Thermometer und schreibt mit einem kleinen Stift auf berußter Scheibe den Gang auf; außerdem ist eine Quadrantteilung zur Ablesung der Einstellung angebracht (Gilb. Ann. II, p. 289, 1799).

Da alle Flüssigkeitsthermometer für Temperaturen der Flamme ungeeignet sind, war natürlich das Problem der Pyrometer bald nach Einführung der Thermometer gegeben.

Der erste Versuch eines Pyrometers stammt von J. Newton (Phil. Trans. 1701). Eine prismatische Eisenstange wird mit Löchern in gleichen Abständen versehen. In diese Löcher bringt Newton die nach ihm benannte Legierung: $2Pb + 3Sn + 5Bi$, und beobachtet deren Schmelzung (100^0) und berechnet dann die Temperatur des Endes der Stange mit Hilfe des von ihm entdeckten Erkaltungsgesetzes: Der Wärmeverlust ist proportional der vorhandenen Wärme, also $d\,T = a \cdot T \cdot d\,t$ oder $\ln T = a\,t$ (über die Grenzen des Gültigkeitsbereiches s. unten). Diese Erfindung Newtons veranlaßte Amontons (1663—1705), ein verbessertes Pyrometer zu konstruieren, indem er eine Reihe von Löchern in die Stange einbohrte und in diese in der Richtung zur Wärmequelle hin 1. Glasstaub, 2. Blei, 3. Sn, 4. Wachs einbrachte (l. c., 1703).

Von Wedgwood (1730—1795) wurde (Phil. Trans. 72, 1782) nach ganz anderen Grundsätzen ein Pyrometer gebaut. Auf eine Messingplatte lötete er schräg gegeneinander gerichtete Messingstäbe, die so eine Art Nute bilden; in diese Nuten schiebt er Tonzylinder, welche in dem Ofen die Temperatur des Feuers angenommen haben und dadurch dünner geworden sind, nachdem sie in kaltem Wasser schnell abgekühlt sind. Je mehr der Zylinderquerschnitt geschwunden ist, um so tiefer kann er in die Nute eindringen. Die Messingstäbe haben z. T. eine Skala, so daß man die Tiefe des Eindringens des Tonzylinders als Maß der Wärme benutzen kann.

Die völlig unzureichende Meßmethode des Wedgwoodschen Verfahrens ist von Fourcroy und Cavallo hervorgehoben, aber ihre Verbesserungen leisteten auch nicht viel mehr. Biot (Traité de

Phys. IV 1816) kehrte zu Newtons Methode zurück, die er dadurch verbesserte, daß er in die Bohrlöcher Quecksilber goß und in dieses Thermometer steckte. Um damit ein Pyrometer herzustellen, muß die Leitung der Wärme durch den Eisenstab bekannt sein. Umgekehrt kann der Apparat benutzt werden, um die Leitfähigkeit zu messen und ist so in erster Linie benutzt worden (s. unten). Im 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts wurden viele Apparate, die zur Messung der Ausdehnung dienten, mit dem Namen Pyrometer versehen, so auch der Ramsdensche (s. unten).

Daß zur Bestimmung hoher Temperaturen besonders die Thermoelemente dienten, ist selbstverständlich (s. diese). Eine Übersicht über die Methoden gab Weinhold (1841—1917, Pogg. Ann. 149, p. 186, 1873, und Progr. der Gewerbeschule zu Chemnitz, Ost. 1873). Wirkliche Pyrometer sind dann von Siemens in seinem Widerstandspyrometer (Pogg. Ann. 149, p. 225), welches schon 1869 konstruiert war, und von Prinsep (Pogg. Ann. 13, p. 576, und 14, p. 529, 1828) und vielen anderen gegeben. Ein Abschluß ist wohl erreicht mit dem optischen und Strahlungspyrometer von Holborn, Kurlbaum (Ber. Berl. Akad. 1901, 13. 6., und Ann. d. Phys. 10, p. 225, 1903).

Neben den Flüssigkeitsthermometern ist zuerst von Fitzgerald († 1782) in A description of a metallic Therm. (Phil. Trans. 1760, p. 823) ein Metallthermometer, bestehend aus vier aneinander gelöteten Metallen, zu einer Spirale gebogen, deren eines Ende fest, deren freies Ende mit einem Zeiger vor einer Kreisteilung verbunden ist. Daß der Apparat mit Selbstregistrierung verbunden werden konnte, hat Kreil wohl zuerst beschrieben (Beschreib. meteorol. Autographen, Wien 1849). Ebenfalls eine Spirale aus Platin und Stahl wendet W. Schmidt an (Pogg. Ann. 130, p. 176, 1867). Diese Spiralthermometer haben weite Verbreitung gefunden und sind sehr empfindlich, bedürfen von Zeit zu Zeit der Nachprüfung mit einem Normalthermometer (Luft). Ein eigenartiges, sehr empfindliches Metallthermometer konstruierte Krecke aus Zinklamellen (Pogg. Ann. 154, p. 61, 1875).

Fehlerquellen bei Thermometern. Bei allen Thermometern wurde vorausgesetzt, daß die Ausdehnung proportional der Wärmezufuhr sei. Schon Amontons hatte (l. c.) erkannt, daß die Flüssigkeiten, speziell Wasser und Weingeist, sehr ungleichmäßige Ausdehnung besitzen, daß dagegen das Luftthermometer innerhalb der Grenzen 0—100° die Bedingung erfülle. Ob auch Hg diese Eigenschaft habe, ist exakt zuerst von Dulong und Petit

(Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 2, T. 2, p. 240, 1816) untersucht, mit dem Resultat, daß Hg über 100° starke Abweichung vom Luftthermometer zeigt. Eine weitgehende Vergleichung liefert Magnus (Pogg. Ann. 57, p. 177, 1842) für Temperaturen über 100°; für Temperaturen zwischen 0 und 100° gab sie Recknagel (ib. 123, p. 115, 1864) mit dem Ergebnis, daß für diese Grenzen nahezu die Bedingung der konstanten Ausdehnung erfüllt sei. Eine Fehlerquelle bei allen Flüssigkeitsthermometern ist die ungleichmäßige Weite der Glasröhren. Der erste, welcher das erkannte und die Kalibrierung der Röhren vorschlug, war Lambert in seiner Pyrometria, 1779. Dann hat Bessel (Pogg. Ann. 6, p. 287, 1826) die Vorschriften für eine Kalibrierung der Thermometer gegeben, und Rudberg (1800—1839) hat dieselbe sorgfältig ausgeführt (ib. 40, p. 562, 1837). Es stellte sich dabei heraus, daß das Glas seinen Ausdehnungskoeffizienten mit der Zeit ändert, so daß wiederholte Eichung notwendig ist.

Um von diesen Fehlerquellen möglichst unabhängig zu sein, konstruierten Dulong und Petit das Gewichtsthermometer, bei welchem ein zu einer engen Öffnung ausgezogener Hals an einen mit Hg gefülltem Glasballon angebracht ist (Ann. de Chim. et de Phys., T. 7, 1818). Es wird bei Temperaturerhöhung das ausfließende Hg auf der Wagschale gewogen; so hat Regnault die Methode vielfach verwendet und ist dabei zu der Formel gekommen: $t = 100 \frac{p(P-\pi)}{\pi(P-p)}$, wo P das Gewicht des Hg bei 0°, P' dasselbe bei 100°, $P - P' = \pi$ ist und p das Gewicht des ausgeflossenen Hg.

Daß die Thermoelemente zur Temperaturmessung mit experimentell festgesetzter Skala sehr geeignet sind, wurde schon bei der Entdeckung richtig erkannt von Seebeck 1821 (Abhandl. Berlin für 1822, p. 265 ff.). Die von Seebeck konstruierten Elemente sollten in den zu untersuchenden Körper eingebracht werden. Eingehend wurde diese Temperaturmessung von Poggendorff in seinen Annalen 1840 besprochen. Es zeigte sich im allgemeinen, daß bei Temperaturzunahme auch die Stromstärke zunahm, allein diese Zunahme wurde bei höheren Temperaturen geringer, es konnte Stillstand eintreten in dieser Zunahme. W. Thomson beobachtete (Phil. Trans. 1856), daß sogar eine Stromumkehr eintreten konnte. Avenarius gab dazu die Erklärung: Sei die elektromotorische Kraft eine Funktion der Temperatur, so daß $E = a + b\,t + c\,t^2$, an der anderen Berührungsstelle sei $E_1 = a + b\,t_1{}^1 + c\,t_1{}^2$, dann ist $E - E_1 = (t - t')\{b + c\,(t + t')\}$. Das ist 0, wenn 1. $t - t' = 0$

ist, 2. wenn $t + t' = -\frac{b}{c}$ (Pogg. Ann. 119, p. 406, 1863). Oersted weist als erster in seiner Allgemeinen Naturlehre, 1823, darauf hin, daß das Thermoelement besonders für strahlende Wärme das geeignetste Thermometer sei.

Dampfspannung.

Über Herons Leistungen auf diesem Gebiete sowie die seiner Nacherfinder ist oben berichtet. Erst Lord Worcester (Edward Sommerset, 1601—1667) kommt in seiner A Century of inventions, 1663, etwas über Heron hinaus. Ein nahezu mit Wasser gefülltes, fest verschlossenes Kanonenrohr wird stark erhitzt; dann zerspringt dasselbe durch den Dampfdruck. Nützlichere Arbeit leistet der Dampf, den er auf das Wasser eines geschlossenen Behälters mit Steigrohr drücken läßt nach Art der Heronschen Wasserhebung; zwei solche Maschinen bildeten die Entwässerungsanlage an der Themse, wo das Wasser über den Deich gehoben wurde. So hat Herzog Cosimo am 28. 5. 1669 die Anlage arbeiten gesehen. Das Worcester verliehene Patent erlosch mit seinem Tode. Savery nahm in einem Patent von 1698 die Worcestersche Idee wieder auf und fügte die Einrichtung hinzu, daß der nach dem Herausdrücken des Wassers mit Dampf gefüllte Behälter nun mit kaltem Wasser übergossen und damit der Dampf schneller kondensiert wurde. Eingehend beschäftigte sich Dionysius Papin (1647 bis 1712/14) mit der Dampfspannung und der Dampfmaschine. Er konstruierte den nach ihm benannten „Topf“, bei welchem zum ersten Male ein Sicherheitsventil angebracht war. Dieser Papinsche Topf (Acta erud. 1682, p. 105), in welchem ein Dampfdruck von mehreren Atmosphären erzeugt wurde, hatte schon einen Vorläufer im Altertum, Philumenos (200 n. Chr., s. oben). Dann bringt Papin in einem Zylinder einen Kolben an, führt unter denselben Dampf ein, und nachdem der Kolben gehoben, erzeugt er unter demselben durch Kondensation des Dampfes einen luftleeren Raum, so daß der Atmosphärendruck den Kolben wieder herunterdrückt. Zwei solche Zylinder, wo die Kolben durch Ketten an einem Wagebalken befestigt sind, geben eine dauernd arbeitende Maschine. Bei dieser Maschine ist zuerst der doppelt durchbrochene Hahn angebracht (Phil. Trans. 1685, p. 1013 u. 1274). Im Jahre 1690 hebt er den Kolben durch Erhitzen des unter demselben in dem Zylinder vorhandenen Wassers; dann nimmt er das Feuer unter dem Zylinder fort und kondensiert den Dampf durch übergegossenes

Wasser, so daß der Luftdruck den Kolben wieder nach unten befördert (Act. erud. 1690, p. 410). Zusammenfassung seiner Versuche bis dahin in Recueil de divers pièces touchant quelques nouvelles machines (Kassel 1695). Dann läßt er wieder den Kolben durch den Dampf selbst heben, kondensiert den Dampf, so daß wieder der Luftdruck den Kolben herunterdrückt. Endlich, 1705 oder 1707, baut Papin eine Wasserhebemaschine, die mit geschlossenem Zylinder und mit Sicherheitsventil versehen ist. Der auf dem Wasser, welches in dem Zylinder ist, ruhende Kolben wird durch den Druck des Dampfes heruntergedrückt, und da das Zuflußventil geschlossen ist, wird das Wasser in das Steigrohr durch ein Sperrventil gedrückt. Nach Schluß des Dampfventils und Abkühlung des Dampfraumes im Zylinder durch aufgeträufeltes Wasser wird der Zuflußhahn geöffnet und das aus dem Sammelbecken zuströmende Wasser hebt den Kolben wieder, so daß die Arbeit von neuem beginnen kann.

Papin hat auch die Abhängigkeit der Spannkraft des Dampfes von der Temperatur gekannt. In einem weiteren Vorschlag zur Verbesserung seiner Maschine will er die Leistung dadurch heben, daß er auf den Kolben in den Zylinder glühende Kohlen legt, damit die Temperatur des einströmenden Dampfes erhöht werde. Aus dem von Gerland 1881 herausgegebenen Briefwechsel Papins mit Leibniz geht hervor, daß Papin bereits 1703/04 mit dem Bau eines Räderdampfschiffes beschäftigt war. Er versah den Kolben mit einer gezähnten Stange, welche in ein Zahnrad griff, welches auf der Welle der Schaufelräder saß. Ein zweiter Zylinder, dessen Kolben die entgegengesetzte Bewegung ausführte, griff mit seiner Stange an der anderen Seite des Zahnrades ein, so daß ein dauernder Antrieb gesichert war, wenn die Kolbenstangen beim Rückweg aus dem Zahnrad gezogen wurden. Mit einem solchen Schiffe wollte Papin nach London, um der Roy. Soc. dasselbe zu zeigen und seine Erfindung zu verwerten. Er fuhr am 24. 9. 1707 mit demselben auf der Fulda von Kassel nach Münden. Hier zertrümmerte die Schiffergilde, welche das Privileg für die Weserschiffahrt besaß, sein Schiff. So bekam die Menschheit erst 100 Jahre später den Fortschritt der Dampfschiffahrt (s. Lotze, Geschichte der Stadt Münden, 1878). Die letzte Vervollkommnung seiner Kolbenmaschine zum Heben der Grubenwässer beschreibt Papin in Ars nova ad aquam elevandam, Frankfurt 1707, wobei nicht mehr der Luftdruck die Arbeitskraft darstellte, sondern der Dampf drückte den Kolben in dem Zylinder nieder und während er kondensiert wurde, hob das unten einströmende Wasser den Kolben wieder in die Höhe.

Das 1705 an Newcommon und Cawley in Dartmouth erteilte Patent betrifft wieder eine atmosphärische Dampfmaschine Papinscher Art. Neu daran ist die „Balance“, an deren einer Seite der Kolben mit Kette befestigt ist; an der anderen hängt der Kolben der Pumpe, welche das Wasser heben soll (Switzer, Hydrostatics II, p. 206). Der die drei Hähne bedienende Wärter Humphry Potter soll die Selbststeuerung der Maschine erfunden haben, indem er die Drehung der Hähne durch Verbindung mit der Balance ausführen ließ. Jedenfalls hatte die 1711 in Wolverhampton aufgestellte Maschine bereits die Selbststeuerung (R. Stuart, Hist. and descript. anecdotes, I, p. 160). Die Weiterbildung der Dampfmaschine hat wesentlich technisches Interesse, kann daher hier übergangen werden.

Die Spannkraft des Wasserdampfes wurde zunächst mit dem spätestens 1661 von O. von Guericke erfundenen Manometer gemessen, so von Papin (l. c.). Boyle behauptet, ein gleiches Instrument erfunden zu haben und nannte es statical baroscop (Phil. Trans. 1666). Für Temperaturen über 100° bediente man sich des Papinschen Topfes, auf dessen Boden ein Gefäß mit Hg gestellt wurde, in welches ein offenes Glasrohr gesteckt wurde, das luftdicht durch den Deckel des Topfes hinausragte. Ebenfalls ragt luftdicht durch den Deckel ein Thermometer in den Dampfraum hinein. Der an dem Quecksilberrohr abgelesene Druck + dem Luftdruck ist der Dampfdruck (Ziegler, Specimen physico-mechanicum de digestore Papinii, Basel 1759). Auf die gleiche Weise beobachtete J. Watt (1736—1819), der 1757 Universitätsmechaniker in Glasgow wurde und seine Untersuchungen über Dampfmaschinen begann (Robison, Syst. of mech. Phil. II, p. 29, 1814). Auch neuere Messungen für höhere Temperaturen sind im wesentlichen nach dieser Methode ausgeführt mit der Abänderung, daß das Barometerrohr durch ein seitlich angebrachtes Manometer ersetzt ist. Für alle Temperaturen hat C. G. Schmidt (Gren, Neues Journ. IV, 1798) eine brauchbare Methode angegeben. Ein Barometerrohr mit weitem Gefäß am kurzen Schenkel hat über dem Quecksilber in diesem Gefäß eine kleine Wasserschicht. Diese wird durch Eintauchen in ein Gefäß mit Wasser (oder Öl) auf die gewünschte Temperatur gebracht; dann wird das Gefäß mit einem einschraubbaren Deckel, der ein Thermometer trägt, geschlossen. Der Apparat ist für Temperaturen über und unter 100° brauchbar.

Mit einem solchen hat Dalton (Gilb. Ann. 15, p. 1, 1803, und Memoir. v. Manchester 1805) gearbeitet. Dalton (1766–1844) bewies

zuerst, daß der Dampfdruck im luftverdünnten Raume gerade so groß ist wie im lufterfüllten. Die Luft verzögert nur die Verdunstung, man muß also länger warten, bis der Raum mit Dampf gesättigt ist. Die Daltonschen Zahlen sind ungenau, weil die Quecksilbersäule ungleiche Temperatur hat.

Eine andere Methode ist von Gay-Lussac (1778—1850) angegeben (Ann. de Chim. et de Phys. 43, 1802, vollständig in Biot, Traité de Phys. I, p. 182, 1816). Die Toricellische Barometerröhre endet oben in ein seitlich umgebogenes kugelförmiges Gefäß *a*. Er bringt in das Rohr etwas Wasser, das auf der Oberfläche des Quecksilbers ruht. Er erwärmt dies Wasser, während die Kugel *a* in einem Wasser- oder Ölbade auf die gewünschte Temperatur gebracht wird, eventuell durch Kältemischung auf Temperaturen unter 0°. Auch hier ist der Fehler, daß nicht der ganze Raum die gleiche Temperatur hat. Ganz ähnliche Apparatur hat Ure für seine ausgedehnten Messungen (Phil. Trans. 1818). Auch die Resultate der großen Untersuchung von Dulong und Arago (Ann. de Chim. et de Phys., T. 43; Pogg. Ann. 18, p. 453, 1830) für Temperaturen von 100—224° und 1—24 Atm. Druck sind nicht genügend genau, weil die gleichmäßige Temperatur des Gasvolums nicht gesichert ist.

Die ersten sorgfältigen Maßuntersuchungen stellte Magnus an (Pogg. Ann. 61, p. 225, 1844), indem er ein durch dreifache Luftschicht gesichertes Kalorimeter herstellte, in dessen innerstem Raume die U-Röhre mit dem zu untersuchenden Dampfe und ein Luftthermometer eingestellt war. Er prüfte zunächst die von August (Pogg. Ann. 13, p. 122, 1828) gegebene Formel: $S = a \cdot b^{\frac{t}{1+\beta t}}$, wo t die Temperatur ist, dann aber änderte er sie zu der Form: $S = a \cdot b^{\frac{t}{\gamma + t}}$, welche die von Magnus erstmalig durch Beobachtung hergestellte Spannkraftkurve gut erfüllte, wenn S die Spannkraft, $a = S_0$, $t =$ Temperatur, b und γ Konstanten bedeuten. Nahezu gleichzeitig begann Regnault (Mém. de l'acad. 21 und Pogg. Ann. 1848, p. 119) seine lange Arbeitsfolge auf diesem Gebiete. Regnault (1810—1878) benutzt zur Interpolation die von Biot gegebene Formel: $\log. S = a + b\alpha^t + c\beta^t$ (Connaissance des tems pour 1844) für Temperaturen zwischen 0 und 100°. Nach dieser Regnaultschen Formel sucht Moritz die wahren Spannungen (Bull. de l'acad. Petersb. XIII, 1854). Für die Temperatur 100—220° entsprechen die beobachteten Werte der Gleichung: $\log. S = a - b\alpha^{t+20} - c\beta^{t+20}$. Die Untersuchung für Temperaturen über 50° ist von Holborn und

Henning (Ann. d. Phys. 26, p. 833, 1908), von Scheel und Heuse für den Bereich unter 0° (ib. 29, p. 723, 1909) abschließend behandelt.

Im 18. Jahrhundert wurde von vielen die Wärme als ein selbständiges Fluidum betrachtet und man nahm dann an, daß durch die Aufnahme von Wärme die Körper bzw. die Moleküle eine Abstoßungskraft erhielten, die z. B. die Ausdehnung der Körper bei Erwärmung erklären sollte. Als dann Eller (Hist. de l'acad. Berlin 1746, p. 42) das sogenannte Leidenfrostsche Phänomen entdeckte — Leidenfrosts De aquae communis qualitatibus, Duisburg 1756, bringt sachlich nichts Neues zu den Ellerschen Beobachtungen — erklärte man die Sache so: Das Phlogiston der heißen Metallplatte stößt das Wasser ab. Auch nach Aufgabe der Phlogistontheorie wurde die von Döbereiner (1780—1849, Gilb. Ann. 72, p. 211, 1822) gegebene richtige Erklärung, daß der Dampfdruck die Wasserkugel (den sphäroidalen Zustand der Materie) trage, von Muncke (Pogg. Ann. 13, p. 235, 1828) abgelehnt. Er wie auch Buff (ib. 25, p. 591) behaupteten, durch die Erwärmung der Metallplatte werde die Adhäsion des Wassers an der Metallplatte aufgehoben, und andere wollten eine Zersetzung des Wassers an der heißen Platte verantwortlich machen. Erst ganz allmählich setzte sich die Döbereinersche Erklärung durch. Aus der bis 1872 fortgesetzten Diskussion ist nur von Wert, daß das gleiche Phänomen auch für Alkohol, Säuren, Salzlösungen usw. (Pogg. Ann. 51, p. 130, 1840) und für Hg (Frankenberg, ib. 75, p. 242, 1848) nachgewiesen wurde.

Daß Salzlösungen bei Temperaturen unter 0° erstarren und bei Temperaturen über 100° sieden, hat schon Fahrenheit (Phil. Trans. 1724) beobachtet. Daß aber auch die Spannkraft der Dämpfe solcher Lösungen niedriger ist als die des reinen Wassers gleicher Temperatur, hat Biot nach Versuchen von Gay-Lussac zuerst ausgesprochen (Traité de Phys. I, 2. Aufl. deutsch von Fechner, p. 309). Genauer untersucht ist die Frage von Babo in: „Über die Spannkraft des Wasserdampfes in Salzlösungen", Freiburg 1847, abschließend von Wüllner (1835—1908, Pogg. Ann. 103, 105, 111, 1858—1860). Danach wächst die Verminderung der Spannkraft des Wasserdampfes mit steigender Temperatur, ist aber für die verschiedenen Salze verschieden, es gibt kein allgemeines Gesetz. Bezeichnet v die Verminderung, s die Spannkraft des reinen Wasserdampfes gleicher Temperatur, so gibt es Salze, z. B. Kochsalz, wo $v = a\,s$ ist; andere, z. B. Kalisalpeter, wo $v = as + bs^2$; andere, z. B. schwefelsaures Kali, wo $v = as - bs^2$ ist. Stets ist v proportional dem Salzgehalt.

Die Spannkräfte der Dämpfe verschiedener Flüssigkeiten sind zuerst von Betancourt (Mém. sur la force expansive de la vapeur, Paris 1792) untersucht; sein Gesetz, daß das Verhältnis der Spannkräfte zu der des Wassers bei gleicher Temperatur konstant sei, ist als falsch erwiesen von Dalton (Gilb. Ann. 15, 1803). Aber Daltons Gesetz, daß die Spannkräfte der Dämpfe aller Flüssigkeiten in gleichen Abständen von ihren Siedepunkten gleich groß seien, ist ebenfalls falsch, wie Ure (Phil. Trans. 1818) nachgewiesen hat. In einer Reihe von Untersuchungen 1854—1860 hat Regnault dann gezeigt, daß alle Dämpfe der Formel genügen: $\log s = a + b\,\alpha^t + c\,\gamma^t$; wo a, b, c, α, γ für jede Flüssigkeit verschieden sind.

Gay-Lussac hatte aus seinen Versuchen über Gemische von Wasser und Alkohol, Äther und Alkohol geschlossen, daß die Spannkraft des Dampfes aus Gemischen gleich der Summe der Spannkräfte der beiden Flüssigkeiten sei (l. c., 1816). Aber Magnus zeigte 1836 (Pogg. Ann. 38), daß dies Gesetz nur gilt für Flüssigkeiten, die sich nicht mischen, z. B. Wasser, Öl, dagegen bei mischbaren Flüssigkeiten, z. B. Äther + Alkohol, die Spannkraft der Dämpfe erheblich geringer ist als die Summe, ja oft kaum die der leicht flüssigen Substanz erreicht. Dies Magnussche Resultat wurde von Regnault bestätigt (C. R. 39, 1854) und hinzugefügt, daß bei Flüssigkeiten, die sich nur in begrenzten Verhältnissen mischen lassen, die Spannkraft des Gemisches nahezu gleich der der flüchtigeren Substanz ist, z. B. H_2O 13,16 und Äther 361,4, aber das Gemenge 362,95 bei Temperatur $15{,}56^0$ usw.

Bei allgemein mischbaren Flüssigkeiten hängt die Spannkraft von dem Verhältnis der Mischung ab; die Spannkraft, dividiert durch die Summe der einzelnen Spannkräfte, ist konstant, wenn beide Substanzen in gleicher Menge vorhanden sind. (Wüllner, Pogg. Ann. 129, p. 354, 1866). Die späteren Untersuchungen hängen eng zusammen mit der Wärmetheorie, werden daher erst dabei besprochen.

Hatten diese Versuche gezeigt, daß die Verdunstung und die Spannkraft des Wasserdampfes bei Wärmezufuhr zunehmen, so lag der Schluß nahe, daß bei der freiwilligen Verdunstung Wärme verbraucht werde, also Abkühlung eintrete. Das ist in der Tat schon sehr früh beobachtet und praktisch verwertet. Bei den Arabern dienten schwammige Gefäße, Alcaraza genannt, zur Kühlung des Wassers. Aber messende Versuche sind über diese Verhältnisse erst spät angestellt. Der erste Forscher auf diesem Gebiete war wohl G. F. Cigna (1734—90) in seiner Abhandlung

De frigore ex evaporatione etc. (Misc. Taur. II, 1760). Er fand: Je schneller die Verdampfung erfolgt, um so stärker die Temperaturerniedrigung. Nahezu gleichzeitig hat v. Mairan zwei Thermometer nebeneinander aufgestellt, von denen das eine mit leinenem Lappen, der in Wasser von gleicher Temperatur wie die Luft getaucht war, umwickelt wurde. Blies er mit einem Blasebalg gegen das feuchte Thermometer, so fand er eine Temperaturerniedrigung von $2^1/_4{}^0$, wenn er gegen das trockene blies, wurde dessen Temperatur um $^1/_2{}^0$ erhöht. Seine Erklärung ist sehr verworren (Diss. sur la glace, II, sec. 2, c. 8 u. 9). Aber Cullen erklärte die Sache richtig mit Verdunstung (Trans. Edinb. 1755, II) und Baumé fand die Abkühlung am stärksten, wenn Vitrioläther verdampfte (Mém. Paris V, p. 405).

Auf Grund dieser Untersuchung entstand 1800 die erste Eismaschine in Europa durch Verdunstung von Vitriolnaphtha durch Cavallo (1731—1800; Phil. Trans. 71, II). Leslie verdampfte 1810 unter dem Rezipienten der Luftpumpe Schwefelkohlenstoff in einem Schwamme, in welchem das Thermometer steckte; er brachte das Hg zum Erstarren. In demselben Jahre zeigte Wollaston (1766—1828) die Kälteerzeugung durch Verdunsten in seinem noch heute gebrauchten Kryophor (Gilb. Ann. 48, p. 174, 1814). Aus dem Kryophor ist das Daniellsche Hygrometer hervorgegangen (Gilb. Ann. 65, p. 169, 1820) und die jetzt übliche Form dieses Apparates hat ihm Döbereiner gegeben (ib. 70, p. 135, 1822). Um alle irrtümlichen Ablesungen zu vermeiden, hat Regnault einen Doppelapparat daraus gemacht (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, 15, 1845), indem er neben das belegte Döbereinersche Rohr ein ebensolches Rohr mit Platinhütchen, nur leer, ohne Äther, stellte, so daß die beiden Platinhütchen unmittelbar nebeneinander lagen und die Taubildung sehr sicher beobachtet werden konnte.

Aus dem v. Mairanschen Versuch ist ganz systematisch das Augustsche Psychrometer entstanden (Pogg. Ann. 5, p. 69 u. 335, 1825), welches die Angabe der Gramm Wasser in einem Kubikzentimeter Luft gestattete. Schon 1803 hatte Dalton (Gilb. Ann. 15, p. 1 u. 122, 1803) aus Versuchen sein nach ihm benanntes Gesetz gefunden: Die Menge des verdampfenden Wassers ist proportional der Differenz aus der maximalen Spannkraft des Wasserdampfes bei der Temperatur des Wassers $= c$ und der in der Luft vorhandenen Spannkraft $= c'$ und proportional der Größe der Oberfläche des Wassers $= a$ und umgekehrt proportional dem Druck der Luft $= b$, also proportional $(c - c') \cdot a/b$. Von diesem Gesetz

ging August (1795—1870) aus, um nun aus der Beobachtung der Temperatur des trockenen und des feuchten Thermometers die Gewichtsmenge des Wasserdampfes in 1 cbm Luft zu bestimmen. Zur Erleichterung der Berechnung gab August 1848 seine Psychrometertabellen heraus.

Ausdehnung.

Daß die Körper bei Temperaturerhöhung eine Ausdehnung erleiden, war schon, wie oben gezeigt ist, im Altertum bekannt. Messungen konnten erst nach Einführung des Thermometers stattfinden. Dabei ist die Voraussetzung, daß die Ausdehnung proportional der Wärmezufuhr sei. Schon in den Saggi, c. 5, ist auseinandergesetzt, daß Gefäße entsprechend der Temperaturerhöhung größeres Volumen haben. Dalencé hat in Traité des baromètres, therm. et notiom., Amst. 1688, diese Abhängigkeit zuerst in voller Allgemeinheit ausgesprochen. Daß für Luft diese Voraussetzung der Proportionalität erfüllt sei, ist von Amontons 1695 gefunden und Mém. Paris 1702 begründet, darum erklärt er das Luftthermometer als das Normalthermometer. Daß diese Voraussetzung für Hg innerhalb der Grenzen 0—100° auch zutrifft, ist von Lavoisier und Laplace nachgewiesen (Biot, Traité I, 1816 [Fechner, p. 266]).

Sorgfältige Untersuchung der Ausdehnung sowohl der Gase wie der festen Körper (Maßstäbe) lieferte Deluc in Recherches sur les modifications de l'atmosphère, 1772. Er benutzte zuerst mikroskopische Ablesung bei der Ausdehnungsbestimmung für Glas und Messing (Phil. Trans. 68, p. 419, 1778, I), dann wandte er die von Ramsden (1735—1805) für Festlegung eines Normalmaßstabes ausgearbeitete Methode an mit zwei in Eis liegenden festen Stäben, an deren Enden zwei Lupen befestigt waren, durch welche er dann die Ausdehnung des im Wasserbade dazwischen liegenden Maßstabes feststellen konnte. Mit dieser Methode untersuchte Roy das normale Längenmaß (Phil. Trans. 1785, p. 461). Dulong und Petit fanden, daß der Ausdehnungskoeffizient für feste Körper in höheren Temperaturen verschieden ist (Ann. de Chim. et de Phys. 7, 1818), daß man also den Ausdehnungskoeffizienten $\beta = a + b\,t$ setzen müsse. Bei den Untersuchungen von Matthiessen (1830—1906) stellte sich heraus, daß auch dies noch nicht genüge, daß man vielmehr setzen müsse $l_t = l_0\ (1 + at + bt^2)$ (Pogg. Ann. 128, p. 512, und 130, p. 52, 1866/67). Daß sich nirgends strenge Proportionalität der Ausdehnung mit der Temperaturerhöhung findet, ist zuerst von Fechner (1801—1887) in der deutschen Ausgabe von Biots

Lehrbuch ausgesprochen (I, p. 292, 1828) und besonders an Roses Metall gezeigt. Valentin Rose (1735—1771) hatte nach dem Vorgange Newtons (s. oben) die Legierung 2 Teile Bi + 1 Pb + 1 Sn, deren Schmelzpunkt bei 93,7° C liegt (Stralsundsches Magaz. II, p. 24, 1772) hergestellt. Erman (1764—1851) hatte die außerordentliche Unregelmäßigkeit der Ausdehnung zwischen 44 und 93,7°, mit einem ausgesprochenen Minimum bei 69°, gefunden (Pogg. Ann. 9, p. 557, 1826). Die gleiche Unregelmäßigkeit fand Erman für Phosphor.

Die Notwendigkeit der Temperaturkorrektion bei spezifischen Gewichtsbestimmungen ist begründet von Bessel (Astron. Nachr. VII, p. 162), desgleichen für Barometerablesungen von Gay-Lussac (Ann. de Chim. et de Phys. 43, 1802). Die erste Korrektionstafel für Barometerablesung ist von Winkler, Halle 1820, herausgegeben.

Eine außerordentliche Verbesserung für Ausdehnungsmessung lieferte Fizeau (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. IV, T. 2, p. 143, 1864, und T. 8, p. 335, 1866; C. R. 68, p. 1125, 1869) in seinem Dilatometer, wobei durch Spiegelung von einer Endfläche Interferenzstreifen erzeugt werden. Fizeau hatte jedoch die Abschätzung der Verschiebung nur in unvollkommener Form ausgeführt. Abbe (1840—1905) maß dieselbe 1884 mikroskopisch (Wied. Ann. 38, p. 453, 1889). Eine wesentliche Verbesserung des Erwärmungsapparates fügte Voigt (ib. 43, p. 831, 1891) dieser Methode hinzu. Man kann also nur einen mittleren Ausdehnungskoeffizienten bestimmen. Das ist für alle Substanzen das Resultat sorgfältiger Messungen.

Die bisherigen Untersuchungen beziehen sich nur auf isotrope Substanzen. Für Kristalle stellt Mitscherlich (1794—1863) fest, daß mit Ausnahme der regulären Kristalle bei den Kristallen nach verschiedenen Richtungen verschiedene Ausdehnungskoeffizienten bestehen (Pogg. Ann. 1, p. 125, 1824, und 10, p. 137, 1827). Das Resultat lautet: Die optisch einachsigen Kristalle, quadratisches und hexagonales System, dehnen sich in den kristallographischen und optischen Achsen stärker oder schwächer aus als in den Nebenachsen! In den Nebenachsen ist die Ausdehnung gleichförmig. In optisch zweiachsigen Kristallen (rhombisches und die drei klinischen Systeme) sind die Ausdehnungskoeffizienten nach allen drei Richtungen verschieden. Diese Resultate sind von Fresnel (ib. 2, p. 109, 1824) bestätigt. In einer langen Reihe von Arbeiten beschäftigt sich Fizeau mit den Kristallen (C. R. 58, p. 423; 60, p. 1161; 62, p. 1101 u. 1133; 64, p. 314 u. 771; 66, p. 1005 u. 1072). Die Kristalle haben nach ihm allgemein drei Ausdehnungskoeffizienten. Er bestätigt die zuerst von Mitscherlich gemachte Erfahrung, daß in einachsigen

Kristallen auch negative Ausdehnungskoeffizienten, z. B. beim Kalkspat, vorkommen und fügt hinzu, daß auch Jodsilber sich bei Erwärmung kontrahiert.

Die Unregelmäßigkeit der Ausdehnung des Wassers ist zuerst von Deluc in Recherch. s. l. modific. de l'atmosph., Genf 1772, bestimmt. Er fand das Dichtigkeitsmaximum des Wassers bei 41° F, und daß es sich zwischen 41 und 32° ebensoviel ausdehnt, wie zwischen 41 und 50°. Mit einer Arbeit von Hällström, der die größte Dichte des Wassers bei 4,108° C fand (Pogg. Ann. 1, p. 129, 1824), setzt eine lange Reihe von Versuchen über das Wasser ein, bis schließlich K. Scheel (Wied. Ann. 47, p. 440, 1892) die größte Dichte bei 3,960° C fand.

Die Ausdehnung der Gase, besonders der Luft, ist zuerst (s. oben) von Amontons (Mém. Paris 1702, p. 155) beobachtet, aber seine Resultate waren nicht richtig, ebensowenig die von Naguet. Daß der Fehler wahrscheinlich dadurch entstanden ist, daß die Luft nicht trocken gewesen ist, hat La Hire (Mém. Paris 1768) nachgewiesen. Auch die späteren Versuche von Monge, Berthollet und Vandermonde haben nicht hinreichend trockene Apparate benutzt (Mém. Paris 1786). Priestley dehnte die Versuche auch auf andere Gase aus (Experim. and Observ., Bd. 7, sec. 6, 1777). Lambert (1728—1777) hat in einer sorgfältigen Arbeit die Wärmeausdehnung der Luft untersucht nach der Methode Amontons' (Pyrometrie, p. 27ff., 1779 posth.) und dabei das nach Gay-Lussac benannte Gesetz abgeleitet. Er gibt den Ausdehnungskoeffizienten mit $0,375 \cdot 10^{-2}$ an und betont, daß man für konstante Dichtigkeit der Luft sorgen müsse. Bald nachher stellte Charles in einer nicht veröffentlichten Untersuchung, welche von Gay-Lussac benutzt ist, fest, daß Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Kohlensäure und Luft zwischen den Grenzen 0—100° gleichmäßige Ausdehnung haben. Diese Arbeit vervollständigte Gay-Lussac (Ann. de Chim. et de Phys. 43, p. 137, 1802) und sprach den Satz aus: Alle Gase dehnen sich gleichmäßig aus mit dem Ausdehnungskoeffizienten $1/266,66 = 0,375 \cdot 10^{-2}$. Dieser Wert ist bestätigt durch Biot (Traité etc. I, p. 182), Dalton (Mem. of the lit. Soc. Manchester 1802) und andere. Daltons Wert 0,3726 ist durch einen Rechenfehler belastet; richtig ergibt sich 0,3912 (Gilb. Ann. 14, p. 267, 1803). Auch Laplace nimmt 0,375 an für 100° (Méc. celest. IV, p. 270, 1805). Erst Rudberg stellte eine sorgfältige Untersuchung an mit dem Resultat 0,364/65 für 100°. Dalton hat in der bezeichneten Arbeit zuerst den Namen und Begriff „absoluter Nullpunkt“

(p. 601) eingeführt. Die Differenz zwischen Rudberg und Gay-Lussac veranlaßte Magnus, eine neue Untersuchung anzustellen, die Gay-Lussacs Fehler vermied. Er fand für Luft 0,3665, für Wasserstoff 0,365659, Kohlensäure 0,369087 usw. (Pogg. Ann. 55, p. 1, 1842). Gleichzeitig untersuchte Regnault (1810—1878) die Ausdehnung der Gase auf verschiedene Weisen und fand für Luft 0,3665 (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, 4, p. 5, 1842). Im Verfolg dieser Frage findet Regnault in Übereinstimmung mit Magnus, daß leichter in den flüssigen Zustand übergehende Gase höhere Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Auch stellt Regnault (ib. 5, p. 53, 1842) das Davysche Resultat, daß der Ausdehnungskoeffizient vom Druck unabhängig sei, dahin richtig, daß mit steigender Dichte auch der Ausdehnungskoeffizient steige.

Spezifische Wärme.

Aus dem Diario der Accademia del Cimento (1841 veröffentlicht) wollen einige herauslesen, daß die Accademia schon die spezifische Wärme gekannt habe. Die Mitglieder machten folgende Versuche. Sie tauchten ein Quecksilberthermometer und ein Weingeistthermometer in warmes und kaltes Wasser und sahen, daß das Quecksilberthermometer schneller steige und falle als das andere, obwohl das Thermometer mit Hg um kleinere Beträge steigt und fällt als das andere. Ferner gossen sie verschiedene gleich warme Flüssigkeiten auf Eis und stellten fest, daß verschiedene Mengen Eis je nach der Natur der Flüssigkeiten geschmolzen wurden. Sie sprachen auch von verschiedener Kapazität der Körper für die Wärme, ziehen aber daraus keinerlei Folgerungen für ihre sonstigen Experimente. Ja, der um die Thermometerausbildung am meisten verdiente Genosse Renaldini ist noch 1694 in seiner Philos. natur. III der Meinung, daß das Thermometer absolute Wärmemengen messe. Die gleiche Anschauung findet sich bei vielen Zeitgenossen, auch bei dem oft in Zusammenhang mit der spezifischen Wärme genannten Boerhave in seinen Elementen der Chemie (T. 1, P. II, p. 270, 1732), während andere sich der Meinung Chr. Wolffs (Nützliche Versuche, II, c. 8, 1714) anschlossen, daß die Erwärmung eines Körpers um so schneller erfolge, je dichter er sei.

Dagegen gibt v. Klingenstjerna an, daß Temperatur und Wärmeinhalt nicht identisch seien (Anmerk. zu Musschenbroeks Elementa physices, p. 604, 1729). Doch erst Black (1728—1799) führte in seiner Vorlesung in Edinburgh 1757 ein Experiment vor,

welches für die spätere Entwicklung bedeutsam wurde. Um *m* Gewichtseinheiten Eis von 32° F zu schmelzen, mußte er *m* Wasser von 172° F damit mischen (Lectures on nat. Phil. I, p. 79 u. 504, 1760—1765). Es sei hier auch gleich bemerkt, daß Black aus dem verbrauchten Brennmaterial berechnet hat, daß zur Verdampfung bei 100° C so viel Wärme gebraucht werde, wie zur Temperaturerhöhung der 445fachen Wassermasse um 1° C. Also gibt Black den ersten Versuch, die Schmelz- und Verdampfungswärme zu messen.

Der Petersburger Physiker Richmann mischte *a* Gewichtsteile Wasser von der Temperatur *c* mit *b* Teilen Wasser von der Temperatur *d*. Dann erhielt er $a + b$ Gew. mit der Temperatur τ, so daß $\tau = \frac{ac + bd}{a + b}$ war (Comm. nova Petrop. I, p. 152, 1750). Diese Mischungsformel versuchte Wilke (1732—1796) auch auf die Mischung von Schnee und Wasser anzuwenden (Norsg. Vet. Acad. Handlingar 1772, p. 97). Er fand, daß Schnee von der Temperatur 0°, um Wasser zu werden, eine bestimmte Wärmemenge verbrauche, und zwar mußte er zur Gewichtseinheit Schnee von 0° eine Gewichtseinheit Wasser von 72° C mischen. Zunächst schloß er daraus, daß die Wärme zu messen sei durch die Wärmemenge, welche die Gewichtseinheit H_2O bei Temperaturerniedrigung um 1° C abgebe; das ist dann die Wärmeeinheit, mit welcher er messen will. In einer folgenden Arbeit (ib. 1781, p. 49) untersucht er nun auch andere Körper; zunächst versucht er, auch durch andere Körper Schnee zu schmelzen, gibt das aber auf, „weil während der Abkühlung des Körpers auch durch die Einwirkung der umgebenden Luft viel Schnee schmelze“. Darum wählt er die Mischungsmethode. Er erwärmt *m* Gewichtsteile des Körpers in Wasser auf C^0 und legt dies in ein Gefäß mit *m* Gewichtsteilen H_2O von 0°; dann erhöht sich die Temperatur auf N^0. Dann ist die spezifische Wärme $= \frac{N}{C - N}$ (p. 59). Dabei führt er auch den „Wasserwert“ ein, indem er angibt, wieviel Gewichtsteile Wasser von C^0 er hätte nehmen müssen, um die gleiche Mischungstemperatur *N* zu erreichen. Dann zeigt er (§ 14), daß man auch durch Messung des schmelzenden Schnees die spezifische Wärme bestimmen könne; denn wenn man *m* Gewichtsteile der Substanz von der spezifischen Wärme *x* auf $72^1/_6{}^0$ C erwärme, so werde dies $m \cdot x$ Gewichtsteile Schnee von 0° schmelzen. Den fehlerhaften Wert $72^1/_6$ erhält er, da an dem Körper eine Menge erwärmten Wassers haftet und er auch den Wasserwert des Gefäßes nicht berücksichtigt; aber er

gibt an, man müsse den Körper an einem sehr dünnen Faden aufhängen und der Körper dürfe nicht das Gefäß berühren, auch müsse das Gefäß von ganz dünnem Blech sein. Natürlich hat Wilke dann auch verschiedene Gewichte der Substanz und des Wassers zugelassen.

Die gleiche Methode wendet Rumford an (Nichols. Journ. 32, 1812, und Recherches sur la chaleur, Paris 1813) mit der Vorsicht, daß er das Kalorimeter (der Name stammt von Lavoisier, s. unten) mit dem Wasser um die Hälfte der zu erwartenden Erwärmung unter die Lufttemperatur abkühlt, um damit denFehler auszugleichen, der durch Wärmeabgabe an die Luft entsteht, wenn der erwärmte Körper in Wasser von Lufttemperatur geworfen wird. Mit der Vorschrift, den zu bestimmenden Körper in einem trockenen Raume zu erwärmen, brauchten auch Dulong und Petit (Ann. de Chim. et de Phys. 7, p. 143, 1818, und 10, p. 395, 1819) die Mischungsmethode für eine große Zahl fester Körper. Dabei fanden sie ihr berühmtes Gesetz, daß das Produkt aus spezifischer Wärme × Atomgewicht konstant sei; für O das Atomgewicht 1 angenommen, ergab sich die Konstante zu 0,37524; für H = 1 würde der Wert für feste Elemente 6,2 sein. In der zweiten Arbeit benutzen sie auch die Erkaltungsmethode (s. unten). Ebenso sind die Untersuchungen von F. Neumann ausgeführt (Pogg. Ann. 23, p. 1, 1831), wobei sich bereits herausstellt, daß das Dulong-Petitsche Gesetz nur angenähert gültig ist. Mit besonderer Sorgfalt und verschiedentlicher Abänderung der Apparatur, aber nach der gleichen Methode sind die Untersuchungen von Regnault ausgeführt (Pogg. Ann. 51, p. 44, 1840 und 98, p. 404, 1856). Da bei festen Körpern durch das Eindringen des Wassers in die Poren eine Verdichtung und damit eine Wärmeentwicklung entsteht, die sogenannte Benetzungswärme, hat Kopp die zu untersuchende Substanz pulverisiert in ein kleines Reagenzglas gefüllt und mit einer die Substanz nicht lösenden Flüssigkeit von bekanntem spezifischen Gewicht bedeckt und dann das Glas geschlossen. Die Erwärmung geschieht in einem Quecksilberbade. Von Kopp rührt die Bezeichnung Atomwärme für das Produkt aus spezifischer Wärme × Atomgewicht her (Lieb. Ann., 3. Suppl., 1864). Mit dieser Methode arbeitet auch Wüllner (Pogg. Ann. 133, p. 302, 1868), besonders auch zur Bestimmung der spezifischen Wärme von Flüssigkeiten. Aus den Versuchen über spezifische Wärme zusammengesetzter Körper hat F. Neumann (l. c.) zuerst den Satz ausgesprochen: Bei allen chemisch ähnlich zusammengesetzten Körpern verhalten sich die spezifischen Wärmen umgekehrt wie die Atomgewichte. Von Regnault ist

der Satz an vielen Beispielen bestätigt (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, 1, und Pogg. Ann. 53, p. 67, 1841). Von Kopp (l. c.) wurde der Satz erweitert in folgender Fassung: Die Atomwärme einer Verbindung ist gleich der Summe der Atomwärmen der sie bildenden Elemente.

H. F. Weber hat dann an verschiedenen Formen des Kohlenstoffs, Bors und Siliziums gezeigt, daß die spezifische Wärme mit wachsender Temperatur wächst bis zu einem Grenzwert, der das Dulong-Petitsche Gesetz nahezu erfüllt (Pogg. Ann. 154, p. 368 und 573, 1875). Die Bedingungen und Grenzen für die Gültigkeit dieses Gesetzes sind untersucht von L. Boltzmann (Wien. Ber. 63, II, p. 731, 1871) und von F. Richarz (Wied. Ann. 48, p. 708, 1893) mit dem Ergebnis, daß die Zahl 6 um so genauer erreicht wird, je größer das Atomgewicht und je größer das Atomvolumen ist.

Eisschmelzungsmethode. Nahezu gleichzeitig mit Wilke beschäftigten sich Lavoisier und Laplace mit der spezifischen Wärme in einer Arbeit, die am 18. Juni 1783 in der Akademie gelesen wurde, also zwei Jahre nach der letzten Wilkeschen Arbeit (Mém. Paris 1784, p. 33). Sie erklären p. 373, von der Wilkeschen Arbeit erst nach Vollendung ihrer Versuche Kenntnis bekommen zu haben. Zunächst geben sie auch die Mischungsmethode an $m \cdot q\,(a - d) = m' \cdot q'\,(b - a')$. Aber sie lehnen dieselbe ab wegen der vielen Fehlerquellen. Daher bilden sie die von Wilke auch erwähnte Eisschmelzmethode aus und wollen das, was Wilke bestimmte, diese Methode nicht zu wählen, dadurch vermeiden, daß das Eis nur Wärme durch den eingetauchten Körper bekommen kann. Sie konstruieren daher das „Eiskalorimeter“ aus drei ineinander stehenden Hohlräumen. Der innerste ist ein Drahtgeflecht zur Aufnahme des erwärmten Körpers, der zweite enthält das zu schmelzende Eis, der äußere enthält Eis und Wasser, um für den Innenraum die Temperatur 0^0 zu sichern. Unter Berücksichtigung des Wasserwertes des Drahtgeflechtes bestimmen sie die spezifische Wärme für eine große Zahl von Körpern, auch flüssigen, und finden bereits die mit der Temperatur steigende spezifische Wärme. Sie messen die Menge des ausfließenden Wassers. Dies Eiskalorimeter ist verschiedentlich zu verbessern gesucht, um den Verlust des am Eise haftenden Wassers zu vermindern, z. B. von Hermann 1834 und Joh. Herschel 1847 (Pogg. Ann. 142, p. 320, 616 u. 619). Der Fehler wird ganz vermieden durch das Eiskalorimeter von Bunsen, das nicht das geschmolzene Wasser mißt oder wiegt,

sondern die Kontraktion des Eises beim Übergang in Wasser mit einem Quecksilberröhrchen mißt. Da kann durch beliebig enge Röhrchen jeder Grad von Genauigkeit erreicht werden (ib. 141, p. 1, 1870). Diese Methode ist von vielen Forschern mit geringfügigen Abänderungen benutzt.

Die Erkaltungsmethode beruht auf dem beim Pyrometer aufgestellten Newtonschen Gesetz (s. oben) und ist von Tobias Mayer (Gesetze und Modifikationen des Wärmestoffs, Erlangen 1796) ausführlich begründet. Eine eingehende Begründung des Newtonschen Gesetzes (Opusc. T. II, p. 437) gibt Fourier in Theorie analyt. de la chaleur, 1822, p. 428, und leitet die Gleichung $d\tau = a \cdot \tau \cdot d\,t$ für die Abkühlung ab, wo τ die Temperatur, t die Zeit, a konstant ist. Danach hat dann zuerst Despretz die Wärmekapazität vieler Körper verglichen, indem er die des Eisens = 100 setzt und findet, daß die spezifische Wärme proportional der Abkühlungszeit dividiert durch die Dichtigkeit ist (Ann. de Chim. et de Phys. VI, 1817). Angewandt wurde sie ferner von Dulong und Petit in der schon zitierten Arbeit (Ann. de Chim. et de Phys. 10, p. 395, 1812), von De la Rive und Marcet (ib., Ser. III, 2) und besonders häufig von Regnault (ib., Ser. III, 9, und Pogg. Ann. 62, p. 53, 1844). Für besonders hohe Temperaturen bei Flüssigkeiten hat Hirn (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. IV, 10, 1867) einen besonderen Apparat konstruiert; er vergleicht die Erkaltungsgeschwindigkeiten der untersuchten Flüssigkeiten mit der des Wassers.

Die Überlegung, daß ein Körper vom Gewicht g_k und der Temperatur t, in gesättigtem Wasserdampf von der Temperatur t' erhitzt, wenn seine mittlere spezifische Wärme σ_k ist, $\sigma_k \cdot g_k \cdot (t' - t)$ Wärmeeinheiten aufnimmt, wobei g_w Dampf zu Wasser kondensiert worden, wenn ferner l die latente Wärme des Dampfes bei t^0 ist, dann also $g_w \cdot l = \sigma_k \cdot g_k \cdot (t' - t)$ ist, führte Bunsen zur Konstruktion seines Dampfkalorimeters, mit welchem er die spezifische Wärme des Glases und Platins sehr genau ermittelte (Wied. Ann. 31, p. 1, 1887). Ein ähnlicher Apparat nach dem gleichen Prinzip wurde von J. Joly in Dublin gleichzeitig konstruiert (Proc. of the Roy. Soc. Dublin, Nov. 1886).

Besondere Schwierigkeit hatten die Methoden für die spezifische Wärme der gasförmigen Körper wegen des geringen spezifischen Gewichts; darum setzte die Pariser Akademie eine Preisaufgabe fest für die spezifische Wärme der Gase. Den Preis erhielten De la Roche und Bérard (Ann. de Chim. et de Phys. 85, p. 72,

1813). Sie setzten in das Kalorimeter eine Kühlschlange ein, durch welche sie unter konstantem Druck und gemessener Temperatur das Gas strömen ließen, bis das Wasser des Kalorimeters gleich warm wurde. Es ist mir nicht recht verständlich, warum die Herren den Preis bekommen haben; denn ihre Methode ist nicht wesentlich anders als die von Lavoisier von 1793, nur daß dieser die Kühlschlange in das Eiskalorimeter setzte, während De la Roche und Bérard die Mischungsmethode anwandten; und ihre Ergebnisse sind auch nicht viel besser als die von Lavoisier in Recueil des Mém. de chim. 1, p. 121, geschrieben 1793, gedruckt 1805. In einer zweiten Methode verglichen sie die Mengen verschiedener Gase, die das Kalorimeter um eine gleiche Anzahl Grade erwärmten, indem sie die spezifische Wärme der Luft = 1 setzten. Auf die Fehler dieses Verfahrens macht Haycraft (Gilb. Ann. 76, p. 298, 1824) aufmerksam und betont, daß die Gase trocken sein müssen. Danach arbeiten De la Rive und Marcet (Pogg. Ann. 10, p. 363, 1827). Sie gelangen zu dem gleichen Resultat wie Haycraft, daß die spezifische Wärme der Gase ihren Dichtigkeiten proportional sei.

Die Versuche von Apjohn (Phil. Mag. 41, 82, 83) und Suermann (Pogg. Ann. 41, p. 489, 1837), die spezifische Wärme der Gase aus der Abkühlung beim Durchströmen durch ein mit Wasser gefeuchtetes Musselintuch zu bestimmen, sind nicht gut gelungen. Erst Regnault stellte die zuverlässigen Versuche an, indem er die Methode von De la Roche und Bérard so verbesserte, daß er die Fehler vermied, indem er das Gas trocknete und statt der Kühlschlange in dem Kalorimeter einen aus drei Kapseln bestehenden Zylinder, der durch spiralförmige Lamellen geteilt war, einsetzte, so daß eine längere und innigere Berührung des Gases mit dem Wasser gegeben war. Auch arbeitete er mit konstantem Druck. Dabei stellte er fest, daß für Gase, welche dem Townleyschen Gesetz genügen, die spezifische Wärme unabhängig von der Temperatur ist, daß dagegen Gase, welche von diesem Gesetz erheblich abweichen, wie z. B. Kohlensäure, mit steigender Temperatur höhere spezifische Wärme haben, daß ebenso die spezifische Wärme unabhängig vom Druck ist bei den Gasen, welche dem Townleyschen Gesetz folgen (Mém. Paris 26, 1852). Mit einer ähnlichen Methode arbeitete auch E. Wiedemann bei seinen Versuchen über spezifische Wärme der Gase (Pogg. Ann. 157, p. 1, 1876).

Eine wirkliche Klärung dieser Verhältnisse wurde angebahnt durch R. Clausius (1822—1888) in seiner ersten Abhandlung (Pogg. Ann. 79, p. 368, 1850, ges. Abh. p. 286), wo er zeigt, daß

die wahre spezifische Wärme eines Gases die bei konstantem Volumen ist $= c_v$, insofern sie die vermehrte Molekularbewegung darstellt. Diese direkt zu bestimmen, war bis dahin noch nicht gelungen; sie läßt sich berechnen aus dem Verhältnis von c_p/c_v, wo c_p die spezifische Wärme bei konstantem Druck ist; dies Verhältnis sei k. Clausius berechnet diesen Quotienten für alle Gase, deren spezifische Wärme bei konstantem Druck von Regnault gemessen war. (Die Methoden, k zu bestimmen, s. in dem Abschnitt Wärmetheorie.) Clausius dehnt seine Betrachtung auch auf Dämpfe aus und versteht unter spezifischer Wärme der gesättigten Dämpfe die Wärmemenge, welche man der Gewichtseinheit gesättigten Dampfes zuführen muß, um seine Temperatur um 1° C zu erhöhen, wenn man gleichzeitig den Dampf so komprimiert, daß er stets gesättigt bleibt. Es ergibt sich dann, daß die spezifische Wärme des gesättigten Wasserdampfes bis etwa 500° C negativ ist (Abhandl. I, p. 73). Analog bei Rankine (Trans. of Edinb. 20). Dies Verhalten ist dann auch für andere Dämpfe, z. B. Benzin, Alkohol usw., nachgewiesen durch Hirn (Kosmos 22, p. 413) und Cazin (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. IV, 14, cf. Dupré, C. R. 56, p. 960). Daß man jedoch c_v auch direkt messen kann, zeigte Joly mit seinem Verdampfungskalorimeter (Proc. of Roy. Soc. Dublin, Nov. 1886).

Der Ausgangspunkt für die Bestimmung der spezifischen Wärme war die Schmelzwärme des Eises. An die oben erwähnte Arbeit von Black sind noch einige historische Notizen zu knüpfen. Blacks oben erwähnte Versuche, welche 1755 begannen, waren von der Beobachtung ausgegangen, daß Eis und Schnee sich in wärmerer Luft noch lange erhalten. Daraufhin machte Black folgenden Versuch, bei welchem die Temperaturangaben hier in Celsiusgrade umgerechnet sind: 143 Gewischtsteile Wasser von 87,77° C mit 119 Gewichtsteilen Eis von 0° geben 262 Gewichtsteile Wasser von 11,66° C, d. h. 79,79 Gewichtsteile Wasser von 1° sind erforderlich, um 1 Gewichtsteil Eis zu schmelzen, diese beim Übergang von Eis zu Wasser „verschluckte" Wärme nannte Black: Wärmestoff der Flüssigkeit. Lavoisier und Laplace führen (l. c.) dafür den Namen „latente" Wärme ein. Black bestimmt die Schmelzwärme des Walrats zu 82,22 bei Schmelztemperatur 56°, des Bienenwachses zu 97,22 bei 60° Schmelztemperatur, des Zinns zu 277,77 bei 219° Schmelztemperatur.

Die Abhängigkeit der Schmelztemperatur vom Druck wurde bei H_2O zuerst von Thomson (Phil. Trans. Edinb. 16 und Phil. Mag., Ser. 3, 37) und von Clausius (Pogg. Ann. 81, p. 163,

1850) bewiesen. Thomson beobachtete bei einem Überdruck von 7,1 Atm. 0,0582° C, bei 15,8 Atm. 0,1295° Erniedrigung der Schmelztemperatur. Weitere Versuche stammen von Mousson (Pogg. Ann. 105, p. 165, 1858). — Bei Walrat und Paraffin fand Bunsen Erhöhung der Schmelztemperatur bei zunehmendem Druck (Pogg. Ann. 80, p. 565, 1850). Das gleiche Resultat für Schwefel und Stearin wurde von Hopkins beobachtet (Athenaeum 1854, p. 1207).

Daß die Schmelztemperatur von Lösungen. wie bei den Legierungen (s. Newton, oben) niedriger ist als die des Lösungsmittels, und zwar proportional der Menge des gelösten Materials erniedrigt wird, ist zuerst von Blagden (1748—1820) nachgewiesen (Phil. Trans. 1788, p. 125). In dieser Arbeit hat Blagden auch zuerst mehrere Versuche zur Ermittlung der Temperaturerniedrigung beim Auflösen von Salzen angegeben. Ausführlich ist die Frage bei den Lösungen untersucht von Rudberg (Pogg. Ann. 114, p. 63, 1861, und 145, p. 600, 1872). Bezieht man den Lösungsgehalt nicht auf Gewichtsmengen, sondern auf Molekularmengen, so ergibt sich das Raoultsche Gesetz: Äquimolekulare Mengen verschiedener Substanzen, die man in gleichen Mengen desselben Körpers auflöst, erniedrigen dessen Gefrierpunkt um gleich viel.

Diese Gedankengänge sind zu einem Abschluß gekommen in der Gleichung van't Hoffs (1852—1911), wonach die Gefrierpunktserniedrigung, wenn 1 Mol einer Substanz in 100 g eines Lösungsmittels gelöst ist, $\gamma = \frac{R}{100} \cdot \frac{T_g^2}{s_g}$, wo R die Gaskonstante, T_g die Gefriertemperatur des Lösungsmittels und s_g die Schmelzwärme ist (Zeitschr. f. phys. Chem. 3, p. 198, 1889).

Die Verdampfungswärme wurde ebenfalls von Black (l. c.) zuerst zu messen versucht. Er veranlaßte dann seinen Schüler J. Watt (1736—1819), die Sache weiter zu verfolgen. Dieser stellte seine Resultate in dem Artikel Steam in Robisons Mechan. Phil. II (Ausgabe von Brewster) zusammen; so bestimmte er nach Fahrenheits Skala die Verdampfungswärme des Wassers bei Atmosphärendruck zu 950 Einheiten. Er machte folgende Versuche (die Temperatur ist in C umgerechnet): 1 Gewichtsteil Wasser von 63° C in Dampf zu verwandeln bedurfte er 559 Wärmeeinheiten bei $^1/_3$ Atm. Druck; um Wasser von 0° in Dampf von 63° zu verwandeln, gebrauchte er 622 Wärmeeinheiten; um Wasser von 0° in Dampf von 100° zu verwandeln, verbrauchte er 624 Wärmeeinheiten. Daraus schloß er, daß die Wärmemenge, welche 1 Gewichtsteil H_2O in gesättigten Dampf verwandelt, stets die gleiche ist (Wattsches Gesetz).

Bei steigender Temperatur wurde die Verdampfungswärme immer kleiner. Außer den Wattschen Experimenten finden sich in dem Robisonschen Werke noch eine Reihe von Versuchen durch Southern und Crighton mit dem gleichen Resultat. Eine ausgedehnte Diskussion über das Wattsche Gesetz schloß sich an. Von größerer Wichtigkeit sind dabei folgende Arbeiten: Rumford (Nich. Journ. 1812) findet die Verdampfungswärme des $H_2O = 567$; Ure (Phil. Trans. 1818) fand 537,22; Despretz (Ann. de Chim. et de Phys. 24, 1813) bestimmte sie zwischen 513 und 540. Despretz dehnte seine Messungen auch aus auf die Verdampfungswärme von Terpentinöl, Alkohol und Schwefeläther. Biot gibt in seinem Traité etc. die Versuche von Clement und Desormes mit dem Resultat 532 an. Zu einem gewissen Abschluß brachte Brix (Pogg. Ann. 55, p. 341, 1842) diese Bestimmungen: für Wasser 550 Wärmeeinheiten, für Alkohol 210,1, für Schwefeläther 89,96, für Terpentinöl 74,04 usw. Regnault arbeitete 1847 nach der gleichen Methode, aber mit verbesserter Apparatur. Regnault untersuchte Wasser von 63,02 bis 194,8°. Er bestätigte Watts Gesetz, daß die Verdampfungswärme mit steigender Temperatur abnimmt von 562,5—471,2 Wärmeeinheiten für die angegebenen Grenzen; für 100° fand er 536,67 (Mém. Paris 21, p. 638). Später (ib., Bd. 26) untersuchte Regnault auch die Dämpfe anderer Flüssigkeiten. Die Abhängigkeit von der Temperatur gibt er in folgender Gleichung, die Verdampfungswärme $\lambda = a + b\,t + c\,t^2$. Die erhaltenen Werte stimmen überein mit der Clausiusschen Gleichung (Pogg. Ann. 98, p. 349, 1856, s. Gastheorie).

Daß bei der Verdunstung des Wassers Kälte erzeugt wird, war schon praktisch längst erprobt und es war diese Erkenntnis ohne wissenschaftlichen Apparat in Bengalen schon seit vielen Jahrhunderten benutzt, um Eis herzustellen. Über diese Eisfabrikation berichtet Barker (Phil. Trans. 1775, p. 252), ausführlicher Williams (ib. 1793, p. 129). Das Interesse für diese Technik war geweckt durch W. Cullen (1710—1796), der über die durch Verdampfen einer Flüssigkeit entstehende Abkühlung in den Essays and Observations, Edinb. II, 1755, eine ausgedehnte Messung veröffentlichte. Darauf konstruierte dann Leslie (1766—1832) seine Eismaschine durch Verdunstung und erreichte eine so starke Abkühlung, daß Hg erstarrte (Gilb. Ann. 43, p. 373, 1810). Carré veröffentlichte 1859 im Journ. chim. méd. seine Eisfabrikation durch Äther, dann mit Ammoniak (C. R. 51, p. 1023, 1860, u, 54, p. 827, 1862), wo Pouillet der Akademie darüber berichtet. Schon 1871 beschrieb C. Linde

im Bayrischen Ind.- u. Gew.-Blatt seine neue Eis- und Kühlmaschine nach der Methode der Abkühlung durch Ausdehnung eines Gases ohne Arbeitsleistung. Dann verband er damit seinen berühmten „Gegenstromapparat“ und veröffentlichte die neue Kältemaschine in Wied. Ann. 57, p. 328, 1896, und Engineer 1896; cf. Bericht d. Deutsch. chem. Ges. 32, 1899, den Artikel: Maschine für die Herstellung flüssiger Luft. Ihm gelang damit auch die Herstellung von flüssigem Wasserstoff.

Wärmeleitung.

Wärmeleitung ist erfahrungsmäßig natürlich in ältester Zeit bekannt und aus der Literatur bis in die fernsten Zeiten nachweisbar, aber messende Versuche über die Wärmeleitung setzen erst sehr spät ein. Der erste, welcher in dieser Richtung tätig war, ist wohl G. W. Richmann gewesen (Nov. Comm. Petrop. III, 308, und IV, 241, 1752). Sein Apparat ist dem Newtonschen Pyrometer (s. oben) nachgebildet. In die Eisenstange sind äquidistant kleine Löcher eingebohrt, welche mit Quecksilber gefüllt werden. Dahinein sind Thermometer eingetaucht. Auf dieselbe Weise beobachtet Ingenhauß (1730—1799; Journ. d. Phys. 34, p. 68, 1789). Es zeigt sich, daß die in gleichen Abständen gemessenen Temperaturen nicht in arithmetischer Reihe fallen. Die graphische Darstellung zeigt eine Kurve, da durch Leitung an die umgebende Luft und durch Ausstrahlung viel Wärme verloren geht. Aus Ingenhauß' Arbeit folgt, daß die Leitfähigkeit der Metalle erheblich größer ist als die anderer Körper. Für die Metalle erhält er die Reihenfolge: Gold, Silber, Kupfer, Zinn, Platin, Eisen, Blei. Im übrigen ist die Leitfähigkeit proportional der Temperatur des erwärmten Endes. Ingenhauß hatte vorher den noch heute in Schulsammlungen üblichen Versuch nach Franklins Anregung ausgeführt, gleich dicke Stäbe verschiedener Substanzen mit Wachs zu überziehen und an einem Ende gleich hoch zu erwärmen. Die Zeiten des Abschmelzens sind umgekehrt proportional der Leitungsfähigkeit. Wie unzuverlässig diese Methode ist, zeigte sich in seinen Resultaten, wonach z. B. Platin ein schlechter Wärmeleiter sein sollte (Ingenhauß, Vermischte Schriften, Wien 1784, II, p. 343).

Auf Nichtmetalle ausgedehnte Versuche stellt Thompson (später Graf Rumford genannt, Phil. Trans. 1792, I, p. 4) an und in längerer Reihe Rumford (Gren, Journ. V, p. 245; Gilb. Ann. V, p. 315; 17, p. 122, 1795—1804), ohne wesentlich Neues zu bringen. Rum-

ford gibt an, daß alle Körper, welche aus feinen Fäden oder kleinen Stücken, die sich in wenigen Punkten berühren, bestehen, schlechte Wärmeleiter sind, z. B. Leder, Wolle, Flaumfeder. Dagegen verwahrt sich Böckmann (Versuche über die Wärmeleitung, Karlsruhe 1812). Despretz gibt folgende Reihe relativer Wärmeleitung: Gold 1000, Platin 981, Silber 973, Kupfer 898, Eisen 374,3, Zink 368, Zinn 303,9, Blei 179,6, Marmor 23,6, Porzellan 12,2, Schamottestein 11,4. Bei den guten Leitern bis zum Zinn ist die Abnahme der Temperatur in geometrischer Progression, wenn die Entfernung von der erwärmten Stelle arithmetisch wächst (Pogg. Ann. 12, p. 281, 1828).

Analytisch ist die Wärmeleitung von Fourier entwickelt (Mém. Paris IV und V, 1812, und Théorie analytique, Paris 1822) und Poisson (Théorie mathém. de la chaleur, Paris 1835). Aus der Fourierschen Entwicklung ergaben sich für die experimentelle Forschung einige grundlegende Gesichtspunkte. Man hat zu unterscheiden: innere und äußere Wärmeleitungsfähigkeit. Der an einem Ende erwärmte Stab leitet die Wärme nicht nur von Schicht zu Schicht nach senkrechten Querschnitten, sondern gibt auch von der Oberfläche dauernd Wärme ab an die Umgebung durch Strahlung, Leitung und Konvektion. Es kann also in einem vertikalen Querschnitt nicht an allen Punkten des Schnittes die gleiche Temperatur gefunden werden. Nur für ganz dünne Drähte kann man annehmen, daß die Leitung für den ganzen Querschnitt die gleiche ist, und er nennt dann die Temperaturdifferenz zweier um 1 cm voneinander abstehender Querschnitte das Temperaturgefälle $= -\frac{dT}{ds}$. Ein stationärer Zustand tritt ein, wenn jeder Querschnitt in der Zeiteinheit ebensoviel Wärmezufuhr erhält, wie er nach außen abgibt. Bezeichnet man mit i den Wärmestrom, d. h. die Wärmemenge, welche in der Zeit 1 beim stationären Zustande durch die Einheit der Fläche q fließt, so ist diese proportional dem Temperaturgefälle, der Proportionalitätsfaktor heiße k = innerer Wärmeleitungskoeffizient. Dann geht durch den Querschnitt q die Wärmemenge $i \cdot q = w = -kq\frac{dT}{ds}$. Dies ist zuerst von Biot in seinem Traité de phys., T. IV, entwickelt und experimentell geprüft. Die Schwierigkeit besteht darin, den Leitungsstrom zu isolieren. Fourier bestimmte die Koeffizienten an Metallplatten (Pogg. Ann. 13, p. 327, 1828). Um nun relative Leitfähigkeit zu vergleichen, genügt es, die äußeren Verhältnisse für alle Substanzen gleichzumachen, z. B.

durch einen dünnen Überzug mit Ruß oder Silber oder eine abgeschlossene Luftschicht herzustellen.

Nach dieser Methode arbeiteten Wiedemann und Franz (Pogg. Ann. 89, p. 497, 1853). Dabei zeigte sich, daß die innere Wärmeleitung der Leitfähigkeit für den elektrischen Strom proportional ist. Sie maßen die Temperaturen mit Thermoelementen. Diesen Parallelismus zwischen Wärmeleitung und Elektrizitätsleitung hatte schon Franklin bemerkt (Roziers Journ. de phys. 1773, p. 276). Ausführlicher wurde das untersucht von Achard (Gothaisches Mag. II, St. 2, p. 39, 1779).

Ångström benutzt periodische Wärmeänderungen an Stäben von solcher Länge, daß das eine Ende stets die Temperatur der Umgebung beibehält, das andere in gleichen Zeiten erwärmt und abgekühlt wurde (Pogg. Ann. 114, p. 513, 1861). Nach dieser Methode hat er eine große Reihe von Versuchen angestellt und dabei gefunden, daß die Wärmeleitung der Metalle bei Temperaturerhöhung abnimmt (ib. 118, p. 423, 1863, und 123, p. 629, 1864). Eine ähnliche Methode, bei welcher er die Erkaltungsgeschwindigkeit benutzt, rührt von Forbes her (Trans. Edinb. 23 u. 24), auch er findet die Abhängigkeit des Leitvermögens von der Temperatur. Eine wesentliche Verbesserung der Ångströmschen Methode gibt F. Neumann (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 66, 1862), indem er die Enden des Stabes alternierend auf die Temperatur t und t' bringt, so daß die Mitte des Stabes auf einer konstanten Temperatur erhalten bleibt durch die von den Enden ausgehenden Erwärmungen und Abkühlungen. Durch Temperaturmessung in gleichen Abständen von dieser Mitte findet er dann die innere und äußere Wärmeleitfähigkeit.

Die mancherlei Fehlerquellen der bisherigen Methoden sucht Kirchhoff (1824—1887) zu vermeiden. Er geht von der Fourierschen Gleichung aus (s. oben) $\frac{du}{dt} = a\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$, wo u die Temperatur zur Zeit t in x, y, z ist, und a die Leitfähigkeit k dividiert durch das Produkt aus spezifischer Wärme und Dichtigkeit ist. Denn die Temperaturerhöhung, welche ein Querschnitt durch die Wärmeleitung von dem benachbarten, höher temperierten Querschnitt empfängt, hängt ab von der spezifischen Wärme des Materials, und da diese auf die Gewichtseinheit bezogen ist, auch von dem spezifischen Gewicht bzw. von der Dichte. Kirchhoff bringt an einem Würfel der betrachteten Substanz eine Seitenfläche durch Bespritzen mit Wasser auf eine höhere oder niedrigere Temperatur

und mißt die Temperaturen an verschiedenen Punkten der Mittelsenkrechten auf dieser Fläche mit Thermoelementen (Wied. Ann. 9, p. 1, 1880). Für diesen Quotienten $k/w \cdot d$ hat H. F. Weber die Bezeichnung Temperaturleitfähigkeit eingeführt.

Um das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit zur elektrischen zu bestimmen, hat F. Kohlrausch (1840—1910) eine neue Methode mit elektrisch geheizten Leitern erfunden (Ann. d. Phys. 1, p. 132, 1900). Wird der durch den Strom geheizte Draht an seinen Enden durch Wasserkühlung auf konstanter Temperatur erhalten, so hat er in der Mitte seine Höchsttemperatur; wählt man nun zwei von der Mitte gleich weit entfernte Punkte und bezeichnet die Temperaturdifferenz zwischen diesen beiden Punkten mit u, die elektrische Spannungsdifferenz derselben beiden Punkte mit V, so besteht zwischen der spezifischen Wärmeleitfähigkeit λ und der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit k die Beziehung $\lambda/k = V^2/8u$. Da k ja anderweit gemessen werden kann, so erhält man aus der Gleichung λ. Das ist von Jäger und Diesselhorst so exakt ausgebildet, daß sie für chemisch reine Metalle sichere Absolutbestimmungen erhalten konnten (Berl. Sitz.-Ber. 38, p. 719, 1899).

Die bisher angeführten Untersuchungen beschäftigten sich ausschließlich mit Metallen und sonstigen als homogen betrachteten Körpern. Die ungleichförmige Wärmeleitung in Hölzern ist von De la Rive und Decandolle zuerst untersucht mit dem Resultat, daß die Leitfähigkeit in Richtung der Fasern größer ist als senkrecht dazu (Bibl. univ. Génève 39, 1828). Frühere Versuche von Rumford waren in sich widerspruchsvoll und ungeeignet. Tyndalls Versuche (Phil. Mag. 4, 5 u. 6) haben nicht wesentlich neue Resultate ergeben. Knoblauch (1820—1895) wandte die Sénarmontsche Methode (s. unten) auch auf Holzarten an, mit gutem Erfolg (Pogg. Ann. 105, p. 623, 1858); er stellte die Wärmeleitungsellipsen dar, bei den härtesten Holzarten war das Achsenverhältnis 1,25 : 1, bei den leichtesten Hölzern (Linde) 1,8 : 1.

Die Wärmeleitung der Kristalle ist von Sénarmont (1808—1862, Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, 21 u. 22, 1847) ausführlich untersucht. Dünne Platten, in verschiedenen Richtungen aus dem Kristall herausgeschnitten, wurden in der Mitte mit einem kleinen Loche versehen, durch welches sie auf eine konische Silberröhre gesteckt wurden, und mit einer dünnen Wachsschicht bedeckt. Durch die Silberröhre wurde ein warmer Luftstrom gesogen. Das schmelzende Wachs erzeugt einen Hof um das Loch. Beim regulären System ist er kreisförmig für jeden ebenen Schnitt, also die isotherme Fläche

eine Kugelschale, im quadratischen und hexagonalen ist die Fläche ein Rotationsellipsoid, in den anderen Systemen wird sie ein dreiachsiges Ellipsoid. Sehr ausgedehnte Untersuchung der einachsigen Kristalle lieferte von Lang (Wien. Ber. 54 und Pogg. Ann. 135, p. 29, 1868). Er unterscheidet auch positive und negative im thermischen Sinne, wobei die thermische Charakteristik mit der optischen in zwei Dritteln der untersuchten Fälle übereinstimmt. Ergänzt ist v. Langs Arbeit durch Jannetaz (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. IV, 29, 1873) für die dreiachsigen Systeme, und auch hier hat sich der Parallelismus mit dem optischen Verhalten im allgemeinen bestätigt. Auch A. M. Mayer hat die Sénarmontschen Resultate bestätigt durch genaue Messungen (Americ. Journ., July 1872). Empfindlicher ist die von Röntgen (Pogg. Ann. 151, p. 604, 1874) angewandte Abänderung des Sénarmontschen Verfahrens, indem er statt der Wachschicht eine Hauchschicht auf der Platte erzeugt, die durch die Erwärmung verdunstet. Es ist natürlich, daß auch gepreßte Gläser sich wie Kristalle verhalten; Sénarmont hat das in einer Ergänzung (l. c. 23, 1847) bereits nachgewiesen.

Die Leitfähigkeit von Flüssigkeiten für die Wärme hat zunächst große Schwierigkeiten gemacht. Die Versuche des Grafen Rumford von 1792—1797 (Phil. Trans. 1792, II, p. 48, und Gren, Neues Journ. 4, p. 418, 1797) veranlaßten ihn, alle Flüssigkeiten und Gase für absolute Nichtleiter zu erklären und alle Erwärmungen nur durch Strömung erfolgen zu lassen. Dem widersprachen freilich Deluc (Gilb. Ann. 1, p. 464, 1794) und Socquet (Journ. de phys. 6, p. 441 1799), aber es fehlte an entscheidenden Versuchen, die auch von anderen, wie Murray, Thomson, Parrot usw., nicht erbracht wurden. Erst Despretz stellte Versuche an, die einwandfrei erweisen, daß das Wasser die Wärme von oben nach unten wie in Metallstäben leite (Pogg. Ann. 46, p. 340, 1839). Mit der oben angegebenen Methode der periodischen Temperaturänderung untersuchte Ångström die Leitung des Quecksilbers, dessen Wärmeleitfähigkeit von der elektrischen stark abweicht (Pogg. Ann. 123, p. 638, 1864). Mit der Methode von Despretz untersuchte dann Paalzow die Wärmeleitung von Quecksilber, Wasser, Schwefelsäure und Kochsalzlösung, Kupfer- und Zinkvitriollösungen (Pogg. Ann. 134, p. 618, 1868). Seine Zahlenwerte stimmen aber durchaus nicht mit den von Guthrie nach einer sehr guten anderen Methode gefundenen Zahlenwerten (Phil. Mag., Ser. 4, 35 u. 37, 1868/69). Um hier Klarheit zu schaffen, unternahm Lundquist die Untersuchung mit Ångströms Methode für Lösungen von $ZnSO_4$, H_2SO_4,

NaCl und H_2O (Undersökning af några-vätskors Leidningsförmåga för Värme, 1869). Jedoch war der Erfolg nur, daß neben zwei Tabellen, die nicht zusammenstimmten, nun eine dritte kam, die mit jenen nicht übereinstimmte. So tobte der Kampf um die Leitungskoeffizienten weiter; ich nenne nur die Arbeiten von Winkelmann (Pogg. Ann. 153, p. 482, 1874; Wied. Ann. 10, p. 668, 1880), Oberbeck (Wied. Ann. 7, p. 271; 11, p. 489 u. 1038, 1880), H. F. Weber (Wied. Ann. 10, p. 103 u. 304 u. 472; 11, p. 345, 1880), L. Graetz (ib. 18, p. 81; 25, p. 337, 1885).

Einen gewissen Abschluß bringt die Arbeit von Wachsmuth (ib. 48, p. 158, 1893). Schon in Oberbecks Arbeit war auf viele Fehler in den bisherigen Untersuchungen, besonders auf die Vermeidung von Strömungen hingewiesen. Wachsmuth bemüht sich, diese und andere Fehler auszuschalten und hat wohl ziemlich zuverlässige Werte erhalten.

Noch größere Schwierigkeiten stellten sich ein bei der Prüfung der Wärmeleitung in Gasen. Der erste, welcher hierüber ernsthafte Versuche anstellte, war wohl Magnus (Pogg. Ann. 112, p. 504, 1861), der einen besonderen Apparat für diese Untersuchung baute. Die Schwierigkeit, welche sich dabei herausstellte, war die, daß er zunächst nur in Wasserstoff eine nach Art der Metalle verlaufende Leitung nachweisen konnte. Die Ausschaltung der Strahlung verursachte besondere Schwierigkeit. Mit der Erkaltungsmethode arbeitete Narr (ib. 142, p. 147, 1871) und stellte folgende relativen Leitfähigkeiten fest: Wasserstoff 5,51, Luft 1,00, Stickstoff 0,98, Kohlensäure 0,81. Von dem Gesichtspunkt der Gasmechanik ging Clausius (ib. 115, p. 1, 1862) aus und berechnete danach die Leitfähigkeit für Luft, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff. Stefan hat dann nach dem Narrschen Verfahren versucht, den absoluten Leitungskoeffizienten für Luft zu messen (Wien. Ber. 24, 1872) und die Theorie zu entwickeln.

Für verdünnte Gase haben Kundt und Warburg die Leitfähigkeit für Wärme theoretisch und experimentell behandelt (Pogg. Ann. 155, p. 337, und 156, p. 177, 1875). Sehr ausgedehnt sind die Versuche von Winkelmann, um die Leitfähigkeit zu messen (ib. 156, p. 427, 1875), dagegen leitete Boltzmann die Leitungsfähigkeit der Gase allein durch Rechnung ab (ib. p. 457, 1875). Die späteren Arbeiten von Winkelmann finden sich in Wied. Ann. 1, p. 63, 1872; ib. 19, p. 649, 1883; 29, p. 68, 1886; 44, p. 177, 1891; 48, p. 180, 1893. Er bestimmte dabei die Abhängigkeit des Leitungskoeffizienten von der Temperatur und dem Druck. Darüber ent-

stand eine Diskussion mit Graetz (ib. 14, p. 232, 1881; 45, p. 298, 1892), welcher sich wesentlich auf die mechanische Gastheorie (siehe unten) gründete. Das Resultat aller dieser Bemühungen ist, daß die reine Wärmeleitung für Gase überaus gering ist; z. B. für vollkommen ruhende Luft ist $\lambda = 0{,}000055$, d. h. ruhendes Gas ist ein vorzüglicher Wärmeisolator, wenn alle Konvektion ausgeschlossen ist.

Wärmestrahlung.

Daß mit den Lichtstrahlen auch Wärmestrahlen verbunden seien, war natürlich auch im Altertum bekannt und der Name Brennpunkt bei Hohlspiegeln zeigt, daß die Vereinigung der Wärmestrahlen in dem Punkte mehr beachtet war als die der Lichtstrahlen. Das ist auch nicht verwunderlich; denn bei den meisten Schriftstellern des Altertums ist Licht wie auch Wärme nichts anderes als „das Element Feuer“. Warm werden heißt, mehr von dem Element Feuer aufnehmen, erkalten heißt, Feuer Atome verlieren, da man sich auch das Feuer atomistisch aufgebaut vorstellte, und Lichtstrahlen aussenden war auch nur ein Aussenden des Elements Feuer. So verstand es sich von selbst, daß, wo Lichtstrahlen waren, auch Wärmewirkung eintreten mußte. Eine selbständige Behandlung der Wärmestrahlung konnte erst einsetzen, als man dunkle Wärmestrahlung untersuchte. Davon ist nach der jetzigen Kenntnis der Literatur des Altertums in der griechischen Welt nicht die Rede. Die erste Bemerkung in dieser Richtung, die wirklich beglaubigt ist, finde ich bei G. Porta (1538—1615) in seiner 1553 zuerst erschienenen Magia naturalis (deutsche Ausgabe B. 20, K. 4, p. 955). Da sagt er, es ist merkwürdig, daß von einem Hohlspiegel nicht nur die Wärme, sondern auch die Kälte reflektiert wird. Wie er das festgestellt hat, sagt er freilich nicht, als er jedoch das Philosche Thermoskop nachgemacht hatte, besaß er die Möglichkeit, mit dessen Hilfe den Nachweis zu erbringen auf dieselbe Weise, wie die Florentiner ihn 100 Jahre später lieferten, indem sie einen Eisblock von 500 Pfund vor einen Hohlspiegel legten und nun im Brennpunkt mit dem Thermometer eine erhebliche Abkühlung nachwiesen (Saggi, cap. 4).

In einem Briefe des der Accademia del Cimento als korrespondierendes Mitglied angehörenden Paolo del Buono aus Wien findet sich (ib.) die Bemerkung, daß die durch eine Eislinse gehenden Strahlen ihre Wärmewirkung nicht verloren haben. Ein weiterer Fortschritt zeigt sich bei Mariotte in seinem Essai sur la nature des couleurs,

1681 (Oeuvres I, p. 288, 1717). Er will die hellen und dunklen Wärmestrahlen unterscheiden; denn die heißen Sonnenstrahlen gehen ohne merkliche Schwächung durch eine Glasplatte hindurch, dagegen die weniger heißen einer irdischen Wärmequelle werden von einer Glasplatte zum größten Teile reflektiert oder in der Platte absorbiert. Mariotte macht dann einen Brennspiegel aus Eis und zeigt, daß die Wärmestrahlen von diesem ungeschwächt reflektiert werden, so daß man mit einem solchen Spiegel im Brennpunkt angebrachtes Schießpulver entzünden kann.

Auch Halley spricht bei seinem Versuch, den Monsun zu erklären (Phil. Trans. 1686) von der dunklen Wärmeausstrahlung der Erdoberfläche und Newton benutzt bei Aufstellung seines Erkaltungsgesetzes (Phil. Trans. 1701) den Wärmeverlust durch Ausstrahlung, aber von einer Untersuchung der Wärmestrahlung ist bei allen nicht die Rede; man nimmt ohne Beweis an, daß für die Wärmestrahlung die gleichen Gesetze gelten wie für die Lichtstrahlung. Daß die Wärmestrahlen sich wie die Lichtstrahlen geradlinig ausbreiten, daß also ihre Intensität mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, hat zuerst Lambert im Jahre seines Todes (1777) durch Versuche bewiesen (Pyrometrie, oder vom Maß des Feuers und der Wärme, Berlin 1779). Scheele betont zunächst, daß die Wärmestrahlen nach denselben Gesetzen reflektiert werden wie die Lichtstrahlen, und er spricht auch von der diffusen Reflexion der Wärme (Von Luft und Feuer, p. 57, 1780).

Der erste neue Gedanke findet sich bei Rochon (Opuscula 1783). Er wollte nachweisen, daß alles Licht stets mit Wärmestrahlen verbunden sei. Darum untersuchte er die farbigen Strahlen des Spektrums, indem er ein Thermometer vom violetten Ende bis zum Ende des Rot über das ganze Spektrum wandern ließ. Dies Thermometer war aber sicher nicht ausreichend fein; denn Rochon fand, daß das Maximum im Gelb liege, statt an der Grenze des Rot. Ob W. Herschel (1738—1822) diese Arbeit kannte, ist nicht auszumachen, auch nicht sehr wahrscheinlich, da die Rochonsche Arbeit erst nach Herschels Publikation hin und wieder zitiert wird. Herschel hatte schon mehrere Jahre die Sache verfolgt, ehe er seine Resultate zusammenfaßte in der ins Deutsche übertragenen Schrift: Untersuchungen über die Natur der Sonnenstrahlen, Celle 1801, p. 69, wo er nun zeigte, daß er mit seinem empfindlichen Thermometer das Maximum der Wärmestrahlen im Ultrarot fand, also im unsichtbaren Teile des Spektrums (Gilb. Ann. 7, p. 137, 1801). Nun untersuchte Herschel diese dunklen Wärmestrahlen genauer und

zeigte, daß das Reflexionsgesetz wie auch das Brechungsgesetz für dieselben gültig waren. Er benutzte einen erwärmten, aber nicht glühenden Eisenzylinder als Strahlenquelle und zeigte die Brechung der Strahlen durch Linsen (Gilb. Ann. 10, p. 68, 1802, und 12, p. 521, 1802).

Bei Wiederholung der Herschelschen Versuche fand Ritter nun auch die verschiedene Fähigkeit der Strahlen des Spektrums, chemische Wirkungen zu leisten. Er untersuchte das Spektrum auf die chemisch wirksamen Strahlen und fand, daß diese im Rot am schwächsten waren, nach dem violetten Ende hin stärker wurden und ihr Maximum gleich hinter dem violetten Ende des sichtbaren Spektrums hatten (Gilb. Ann. 7, p. 525, 1801); er benutzte dazu Chlorsilber, dessen Schwärzung durch Lichtstrahlen von H. Schulze (Acad. Leop. 1727, I, p. 528) nachgewiesen war. Ausführlicher, aber unter Berufung auf Ritter stellt Th. Young dieselben Versuche mit Chlorsilber an und maß die Intensität (Gilb. Ann. 39, p. 282, 1811). Die gleichen Resultate fand Wollaston unter Benutzung einer Lösung von Gummi-Guajak, bei welchem die gelbe Farbe durch das Licht in Grün verändert wird (Gilb. Ann. 39, p. 291, 1811).

Gegen Herschels dunkle Wärmestrahlen wandte sich Leslie (Gilb. Ann. 10, p. 88, 1802), jedoch wurden seine Versuche teils von Herschel selbst (l. c.), teils von Englefield (Gilb. Ann. 12, p. 403, 1802) richtig gedeutet und seine theoretischen Bedenken widerlegt. Das Wertvolle an der Leslieschen Arbeit war der nach ihm benannte Würfel, mit welchem er die Abhängigkeit der Wärmeausstrahlung von der Oberflächenbeschaffenheit nachwies (ausführlich in Experimental inquiry, London 1804). Da Leslie hier auch mit dem Differentialthermometer arbeitet, haben ihn verschiedene für den Erfinder dieses Apparates gehalten; daß das nicht richtig ist, wurde schon oben gezeigt.

Saussure und Pictet wiesen die dunkle Wärmestrahlung und deren gesetzmäßige Reflexion an zwei Metallspiegeln nach, in deren einem Brennpunkt eine glühende Eisenkugel befestigt war, während in dem Brennpunkt des zweiten konaxial aufgestellten Spiegels Schießbaumwolle oder ein Quantum Pulver zur Explosion gebracht wurde (Gilb. Ann. 13, p. 120, 1803). Für diesen Versuch baute Kries einen kompendiösen Apparat (Gehlens Journ. 7, p. 201, 1806), der noch heute viel gebraucht wird.

Eine ausführliche Wiederholung und Prüfung der Herschelschen Beobachtungen unternahmen Bérard (Gilb. Ann. 45, p. 381, 1814) und Seebeck (Schweigg. Journ. 15, 1815 und 40, Heft 2, 1824).

Bérard (1789—1869) untersuchte die Wärmeverteilung im Spektrum und zeigte, daß die Lage des Maximums je nach dem Stoffe, woraus das Prisma bestand, verschieden sei; er zeigte, daß auch beide Strahlen des doppelbrechenden Kalkspats Wärmestrahlen enthielten. Mit dem Malusschen Apparat wies er die Polarisation der Wärmestrahlen nach. Mit Chlorsilber bestätigte und erweiterte er Ritters Versuche über die ultravioletten Strahlen des Spektrums und benutzte ebenfalls das von Gay-Lussac und Thénard entdeckte explosible Gemisch von H und Cl, um nachzuweisen, daß es die chemisch wirksamen Strahlen seien, welche die Explosion bewirkten.

Seebecks Resultate sind dagegen folgende: 1. In allen prismatischen Farben sind Wärmestrahlen, am wenigsten im Violett. 2. Bei einigen Flüssigkeitsprismen, z. B. H_2O, Weingeist, Terpentinöl usw. liegt das Maximum der Wärme im Gelb, bei anderen, z. B. Salmiak, Sublimatlösung, liegt es zwischen Gelb und Rot, bei Crownglas im vollen Rot, bei Flintglas im Ultrarot. Seebeck maß mit einem empfindlichen Luftthermometer und führte diese Verschiedenheit der Maxima auf die Absorption der Wärmestrahlen in den Medien der Prismen zurück.

Die verschiedene Absorption der Wärmestrahlen durch Glasplatten zeigte De la Roche. Dabei fand er, daß die dunklen Strahlen (unter 100° C) von Glasplatten erheblich stärker absorbiert werden als die Wärmestrahlen von leuchtenden Körpern (Journ. de Phys. 35, p. 201, und Gilb. Ann. 46, 1814).

Die Wärmeausstrahlung der Körper wurde zuerst genauer untersucht von Rumford (Phil. Trans. 1804 und Gilb. Ann. 17, p. 33 u. 213, 1804). Er füllte zwei gleiche Messingzylinder mit heißem Wasser; der eine war mit Leinen umhüllt, der andere war blank; ersterer kühlte erheblich schneller als letzterer ab. Bei den ausführlichen Untersuchungen De la Roches (Gilb. Ann. 55, p. 49, 1817) stellte sich bereits heraus, daß das Newtonsche Erkaltungsgesetz nur für geringe Temperaturdifferenzen gültig sei. Das veranlaßte Dulong und Petit, das Newtonsche Gesetz einer Nachprüfung zu unterziehen. Sie verglichen die Ausstrahlung im luftleeren und im lufterfüllten Raume und ersetzten die Newtonsche Gleichung durch eine andere sehr komplizierte. Denn es zeigte sich, daß die Erkaltung sehr wesentlich von der Natur der Umgebung abhängt. Aber die Unterscheidung des Wärmeverlustes durch Strahlung und Leitung ist bei ihnen nicht klar herausgestellt (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. II, 7, p. 225, u. 337, 1818, und Schweigg. Journ. 25, p. 325, 1819). Daß die Wärmeausstrahlung der Erde

für die Taubildung wesentlich ist, wurde zuerst von Wells nachgewiesen (Ann. de Chim. et de Phys. 5, p. 683, 1817). Frühere gelegentliche Beobachtungen sind in Schweigg. Journ. 22, p. 87, 1815, zusammengestellt.

Die späteren genaueren Untersuchungen über die Wärmeausstrahlung benutzen fast ausschließlich die Thermoelemente für die Temperaturmessung. So Melloni (1798—1854), der zunächst die Leslieschen Resultate bestätigte (Pogg. Ann. 35, p. 134, 387, 549, 1835), dann aber zuerst fand, daß die Ausstrahlung nicht nur von der Oberfläche, sondern von einer verschieden dicken Schicht ausgehe, indem er auf die Fläche mehrere Schichten der ausstrahlenden Substanz brachte, besonders bei Ruß, war die Ausstrahlungstiefe sehr groß (Pogg. Ann. 52, p. 423, 1841, und 65, p. 101, 1845). Tyndall brachte die zu untersuchenden Körper der Ausstrahlung in Pulverform auf die Fläche und maß die Ausstrahlung bei verschiedenen Dicken dieser Schichten (Phil. Mag., Ser. 4, 32); dazu sind zu vergleichen die Versuche von Knoblauch (Pogg. Ann. 70, p. 337, 1847) und Magnus über glattes und rauhes Platin (ib. 124, p. 476. 1865).

Tyndall fand auch, daß die Wärmestrahlung schneller steigt als die Temperatur des strahlenden Körpers (ib. 124, p. 36, 1865). Den Einfluß des umgebenden Mediums stellte Clausius fest in dem Satze, daß das Emissionsvermögen eines Körpers dem Quadrat des Brechungsindex des Mediums, in welchem sich der strahlende Körper befindet, direkt proportional ist. Sei E das Emissionsvermögen im leeren Raume, n der Brechungsindex des Mediums, so ist das Emissionsvermögen in dem fraglichen Medium $= c = n^2 E$ (Pogg. Ann. 121, p. 3, 1864). Dies Gesetz wurde durch Quintus Icilius in allen seinen Teilen bestätigt (ib. 127, p. 604, 1866).

Die Analogie zwischen Wärmestrahlen und Lichtstrahlen erstreckt sich nicht nur auf Reflexion und Brechung, sondern auch auf Polarisation. Forbes zeigte das an Glimmerplatten (Phil. Mag., Ser. 3, 6, 1835); ein Nicolsches Prisma und ein einfaches Kalkspatrhomboeder wandte Knoblauch an (Pogg. Ann. 74, p. 184, 1848). In diesem Jahre hat Knoblauch auch die von Matteucci (1811—1868) (Pogg. Ann. 22, p. 462, 1833) angestellten Versuche über Interferenz der Wärmestrahlen wiederholt und erweitert (ib., 108, p. 610). Die Interferenz polarisierter Wärmestrahlen fand Forbes (s. oben) mit Glimmerplatten zwischen zwei Nicols. Mit Platten zweiachsiger Kristalle zeigte Knoblauch (ib. 131, p. 1,

1867) die Interferenz, während Tyndall bei seinen Polarisationsversuchen mit zwei Nicols die Interferenz nicht fand (Phil. Mag., Ser. 4, 39). Mit Fresnelschen Spiegeln erzeugten Fizeau und Foucault ihre Wärmeinterferenz (C. R. 25, 1847). Knoblauch hat auch ein besonders Prisma, das Interferenzprisma, hergerichtet (Berl. Akad. Ber., August 1851).

Auch die Beugung der Wärmestrahlen durch Gitter wurde nachgewiesen von Seebeck (Pogg. Ann. 77, p. 574, 1849). Bei allen diesen Versuchen war die Intensität durch Thermoelemente gemessen.

Die erste Beobachtung eines Thermostromes machte J. Ritter (Gilb. Ann. 9, p. 292, 1801). Wenn er zwei Drähte nahm, den einen einseitig erwärmte und dann dieselben zur Berührung brachte mit dem erwärmten Ende, so zeigte sich ein Strom, der mit fortschreitender Abkühlung schwächer ward. Aber diese Beobachtung, wie viele Entdeckungen Ritters, blieb unbeachtet, so daß Seebeck 1821 durchaus selbständig die Thermoströme neu entdecken konnte (Abhandl. Berl. Akad. 1822/23, p. 265—373). Darin wies er die Ströme auf dieselbe Weise nach, wie es noch heute gewöhnlich gezeigt wird. Er lötete auf einem Wismutstab einen Kupferbügel mit beiden Enden an und stellte auf den Wismutstab zwischen den Stab und den Bügel eine kleine Magnetnadel; erwärmte er eine Lötstelle, so entstand ein Strom.

Seebeck untersuchte viele Paare von Metallen und stellte eine Reihe auf, deren äußerste Glieder Wismut und Antimon waren, mit dem Sinne, daß an der erwärmten Berührungsstelle der Strom positiver Elektrizität von Wismut zum Antimon geht, so daß die sich nicht berührenden Enden entgegengesetzte Ladung zeigen: Wismut —, Antimon +. Oersted schlägt bereits 1823 in seiner „Allgemeinen Naturlehre“ vor, ein Thermoelement zur Messung strahlender Wärme zu benutzen. Den gleichen Vorschlag machte Becquerel (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. II, 31, p. 371, 1822) sowohl für strahlende Wärme, wie auch zur Temperaturmessung in Räumen und Körpern. Doch erst, nachdem Nobili (1784—1835) seinen empfindlichen Thermomultiplikator konstruiert hatte (Pogg. Ann. 20, p. 245, 1830, und 27, p. 440, 1833), setzte sich die Temperaturmessung mit Thermoströmen durch.

Besonders für die Absorption der Wärmestrahlen wurde diese Anwendung von Wert. Die Versuche von Leslie 1804 (s. oben), die Absorption zu bestimmen, gaben verkehrte Resultate, weil Leslie von verkehrten Voraussetzungen ausging. Schon weit

früher hatte Prevost (Rech. physico-méc. s. l. chaleur, Genf 1792) aus seinen Versuchen den Satz abgeleitet: Das Emissionsvermögen ist gleich dem Absorptionsvermögen. Ihm war auch die besonders starke Absorption der Strahlen durch Ruß bekannt. Durch eine sinnreiche Konstruktion des Differentialthermometers und Auswahl der Wärmequelle konnte Ritchie (Pogg. Ann. 27, p. 450, 1833) nachweisen, daß das Emissionsvermögen eines Körpers, bezogen auf das des Rußes, gleich ist dem Absorptionsvermögen, ebenfalls auf Ruß als Einheit bezogen. Dies Verhalten wurde dann durch ausführliche Versuche von Melloni (Pogg. Ann. 35, p. 573, 1835) mit Thermoelementen nachgewiesen. Einen umfassenden Bericht über die bis dahin bekannten Versuche gab Biot der Pariser Akademie 1836 (Auszug Pogg. Ann. 39, p. 9). Dabei zeigte sich bereits, daß die Körper verschiedenen Wärmestrahlen gegenüber sich verschieden verhalten, ebenso verschieden hohen Temperaturen der Strahlenquelle gegenüber.

Exakte Messungen über diese Verhältnisse unter Annahme des Newtonschen Strahlungsgesetzes sind zuerst von De la Provostaye und Desains (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. III, 30, 1850; C. R. 34, 1852 u. 38, 1854) ausgeführt. Über den Zusammenhang von Emission und Absorption stellte Kirchhoff (Berl. Akad. Ber., Dez. 1859) zuerst den Satz auf: Das allen Körpern gemeinsame Verhältnis des Emissionsvermögens zum Absorptionsvermögen b/a ist eine Funktion der Wellenlänge und der Temperatur. In der ausführlichen Untersuchung über das Verhältnis b/a beweist Kirchhoff den Satz: „Das Verhältnis des Emissionsvermögens zum Absorptionsvermögen ist für alle Körper bei derselben Temperatur dasselbe“ (Ges. Abhandl., Leipzig 1882, p. 571). In dieser Abhandlung wird auch zum ersten Male eine exakte Definition des schwarzen Körpers gegeben, nämlich als der Hohlraum, welcher von Körpern gleicher Temperatur, die keinerlei Strahlung durchlassen, umschlossen ist (p. 597). Ein solcher vollkommen schwarzer Körper wurde praktisch zuerst von Christiansen (Wied. Ann. 21, p. 364, 1884) hergestellt, indem er in einen Messingwürfel konische Löcher bohrte, Seitenwände und Löcher stark versilberte; beim Erhitzen dieses Würfels erschienen die Löcher als vollkommen schwarze Körper.

In der Kirchhoffschen Arbeit war bereits vorausgesetzt, daß Wärmestrahlen und Lichtstrahlen wesentlich gleich sind und nur Unterschiede der Wellenlängen bestehen. Aber bis zu dieser Erkenntnis war ein langer und wechselvoller Weg. Die älteren Ver-

suche sind schon erwähnt. Ein wesentlicher Fortschritt wurde durch Forbes (Trans. Edinb. 14, 1838) erzielt, indem er nachwies, daß (mit verschwindenden Ausnahmen) alle Wärme aussendenden Körper eine Wärmefarbe haben, d. h. Wärmestrahlen verschiedener aber bestimmter Wellenlänge aussenden. Für durchgehende Wärmestrahlen hatte De la Roche (Gilb. Ann. 46, 1814) in verschiedenen Platten schon verschiedenes Verhalten beobachtet. Genauer wurde das von Seebeck (Berl. Abhandl. 1819) untersucht, doch erst Melloni (Pogg. Ann. 35, p. 277 u. 401, 1835, und 62, p. 18, 1844) bewies, daß auch für die durchgehenden Strahlen den Körpern Wärmefarbe zukomme, daß also die Intensität der Wärmestrahlen wesentlich von der Dicke der durchstrahlten Schicht abhänge. Als Ausnahmen zeigten sich nur Steinsalz und Sylvin (Chlornatrium und Chlorkalium), die keine Wärmefarbe haben, also alle Strahlen gleich gut durchlassen. Daher wurde zuerst von Joh. Müller (Pogg. Ann. 105, p. 33, 1858) das Sonnenspektrum mit Steinsalz- und Sylvinprismen untersucht, während Franz mit solchen Prismen die Diathermanität (Diathermansie) von Gasen und Flüssigkeiten bestimmte (ib. 94, p. 337, 1855, und 101, p. 46, 1857). Magnus konstruierte dann einen Apparat zur Untersuchung der Gase in dieser Beziehung, wobei er äußere Störungen möglichst ausschloß (ib. 112, p. 351 u. 517, 1861). Auch Tyndall (1820—1893) hat solche Messungen vorgenommen (Phil. Trans. 1864, p. 201 u. 327), doch zeigte die lange Auseinandersetzung mit Magnus, daß die Fehlerquellen bei Tyndall in seiner Apparatur stecken (Pogg. Ann. 130, p. 211, 1867). Die verschiedene Wärmefärbung der Metalle ist zuerst von Knoblauch (ib. 101, p. 187, 1857) nachgewiesen und festgestellt, daß die Wärmefärbung nicht identisch ist mit der Lichtfärbung.

Bolometer.

Die weiteren Untersuchungen über Wärmestrahlung hängen zum größten Teile mit der Benutzung des Bolometers zusammen. Schon 1835 stellte Lenz (1804—1865, Pogg. Ann. 34, p. 440) und ebenso Davy (ib., p. 428) fest, daß die meisten Metalle bei Erwärmung eine recht große Einbuße an elektrischer Leitfähigkeit erfahren. Darauf gründete Svanberg (ib. 84, p. 416, 1851) die Konstruktion eines „galvanischen Differentialthermometers“, d. h. er schaltete in den einen Zweig der Widerstandsbrücke eine enggewundene Spirale übersponnenen und mit Kienruß bedeckten Kupferdrahtes von 0,21 mm Durchmesser ein, welche er in eine mit Deckel versehene

Kapsel steckte. Bei geschlossenem Deckel wurde die Nullstellung festgestellt; wurde der Deckel geöffnet und die Spirale bestrahlt, so gab die Strommessung ein Maß der Bestrahlung. Sehr viel empfindlicher und zuverlässiger war der Apparat, den Langley (Proc. Amer. Acad. 16, II, 1881, und Sill. Journ. 21, p. 187, 1888) konstruierte und ihm den Namen Bolometer gab. Der wärmeempfindliche Körper ist hier ein schmaler Platinstreifen von 0,2 mm Dicke, mit Ruß überzogen. Diesen Streifen baute er in das „Spektrobolometer" ein, mit welchem er die Wärmeverteilung im Sonnenspektrum untersuchte. Die ganze Vorrichtung nannte er „The Actinic Balance"; diese Bezeichnung kommt in amerikanischen Zeitschriften noch heute vor. Unabhängig von Langley (1834 bis 1906) hatte auf Veranlassung von Helmholtz 1882 Baur einen Radiometer genannten Apparat ganz ähnlicher Konstruktion gebaut (Verh. phys. Ges. Berlin 4, p. 15, 1882, und Wied. Ann. 19, p. 12, 1883). Wesentlich verbessert wurde das Bolometer durch Lummer (1860--1925) und Kurlbaum, die Gitter von Platin-Silberstreifen anwandten (Wied. Ann. 46, p. 204, 1892).

Absorption im Spektrum.

Schon 1840 hatte John Herschel (Phil. Trans. 130, I, p. 1) festgestellt, daß die Absorption im ultraroten Teile des Spektrums ungleichförmig sei, und J. W. Draper fand zwischen 800 und 1000 $\mu\mu$ drei breite Banden (Phil. Mag. 22, p. 120, 1843), wodurch die Ungleichförmigkeit der Absorption erwiesen war. Nun zeigte J. Müller (Pogg. Ann. 105, p. 543, 1858), daß die Wärmeverteilung im Spektrum bei Benutzung eines Glas- oder Steinsalzprismas wesentlich verschieden war von dem Gitterspektrum, welches er als das Normalspektrum bezeichnete. Besonders in dem unsichtbaren Teile des Spektrums machte sich das geltend. Tyndall (1820 bis 1893) glaubte nachgewiesen zu haben, daß die unsichtbare Strahlung der Sonne zweimal so groß sei als die sichtbare (Phil. Trans. 156, I, p. 83, 1866). Die Diskontinuität der Wärmestrahlen wurde zuerst von Lamansky exakt geprüft (Pogg. Ann. 146, p. 200, 1872), indem er drei „Lücken" nachwies, und zwar von 0,815—0,835 μ, von 0,893—0,930 μ, von 0,935—0,980 μ. Man meinte zunächst, alle diese Lücken durch Absorption der Sonnenstrahlen in der Atmosphäre erklären zu können. Hier setzten Langleys Untersuchungen ein. Er stellte das Wärmespektrum des Prismas und des Gitters nebeneinander. Dabei zeigte sich, daß das prismatische Spektrum

das Maximum der Energie im Ultrarot (etwa 1,00 μ) habe, während das Gitterspektrum sein Maximum nahezu im sichtbaren Gelb (etwa 0,65 μ) zwischen D und C zeige. Für beide verfolgte er das Wärmespektrum bis auf 3 μ (Wied. Ann. 19, p. 226 u. 384, 1883). Er stellte die Energiekurven als Funktion der Wellenlängen dar und zeigte damit zuerst die außerordentlichen Intensitätsschwankungen. Diese sind dann in den Untersuchungen von Paschen mit Gitterspektrum und Bolometer eingehend untersucht (Wied. Ann. 48, p. 272, 1893). Paschen bemerkt dabei, daß keine Theorie diese „Lücken" erklären könne. W. Wien zeigte ferner, daß überhaupt in der Wärmestrahlung nicht jede Wellenlänge vertreten sei und daß die Energiekurve auf der Seite der großen Wellenlängen wiederholt auf unendlich kleine Werte herabsinke (Wied. Ann. 49, p. 633, 1893). Erst durch die ausgedehnten Rubensschen (1865—1922) Untersuchungen wurde das Gebiet der Wärmestrahlung dem der elektrischen Wellen mehr genähert (Wied. Ann. 54, p. 476, 1895; 60, p. 418 u. 724, 1897; 65, p. 241, 1898 usw.). Doch gehen diese Arbeiten über die zeitliche Begrenzung dieses Buches weit hinaus.

Strahlungsgesetz.

Inzwischen war durch die Untersuchungen von Kundt und Warburg gezeigt, daß die Resultate von Dulong und Petit, sowie die von De la Provostaye und Desains über die Strahlung nicht richtig sind (Pogg. Ann. 156, p. 177, 1875) und Oberbeck hat aus theoretischen Gründen deren Unhaltbarkeit bewiesen (Wied. Ann. 7, p. 271, 1879). Bei der Kritik über diese Verhältnisse fand Stefan dann das Gesetz, daß die durch Strahlung übergeführte Wärmemenge proportional ist der vierten Potenz der absoluten Temperatur des strahlenden Körpers (Wien. Ber. 79, p. 391, 1879). Dies Gesetz wurde alsbald durch Graetz innerhalb der Grenzen 0—250^0 experimentell bestätigt (Wied. Ann. 11, p. 913, 1880). Durch Boltzmann ist dann aus der elektromagnetischen Lichttheorie das Stefansche Gesetz theoretisch abgeleitet für den vollkommen schwarzen Körper (ib. 22, p. 291, 1884), so daß die Gesamtstrahlung $S = \sigma T^4$ zu setzen ist.

Die ausführliche Prüfung des Gesetzes durch bolometrische Messung verdanken wir Lummer und Pringsheim (ib. 63, p. 395, 1897), welche mit dem von Lummer und Kurlbaum wesentlich verbesserten Bolometer (s. oben) arbeiteten; sie erhielten die Übereinstimmung mit dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz innerhalb

der Temperatur 290—1500°, so daß, wenn T_1 die Temperatur des vollkommen schwarzen Körpers, T_2 die des Bolometers ist, die gemessene Gesamtstrahlung $S = a\,(T_1^4 - T_2^4)$ ist. Nun fand Kurlbaum auch eine Methode, die Angaben des Bolometers, welche bis dahin nur relative Werte ergaben, auch absolut zu bestimmen, und nach dieser Methode ergab sich für σ der Mittelwert: $\sigma = 5{,}32 \cdot 10^{-12}$ Watt durch Beobachtung für Temperaturen zwischen 0 und 100° C (Wied. Ann. 65, p. 746, 1898).

Daß die früher allgemein angenommene Ansicht, daß das Leuchten der Gase nur von der Temperatur abhänge, nicht richtig ist, hat wohl zuerst K. Ångström nachgewiesen und mit Bewußtsein ausgesprochen (Wied. Ann. 48, p. 493, 1893) und Pringsheim bezweifelt, daß eine Temperaturerhöhung allein überhaupt eine Lichtemission bedingen kann; der Mechanismus des Leuchtens sei etwas ganz anderes als der der Wärmestrahlung (ib. 49, p. 347, 1893). Doch hängt diese Frage sehr eng zusammen mit den Vorstellungen über das Wesen der Wärme einerseits und dem Zusammenhang von Temperaturstrahlung und Lumineszenzstrahlung und wird daher erst in der Optik behandelt.

Das Wesen der Wärme.

Gewöhnlich liest man, daß bis zur Einführung der mechanischen Wärmetheorie allgemein die Wärme als ein Stoff angesehen sei, der dem Körper zugeführt oder weggenommen werden könne. Das ist für jede Zeitepoche unrichtig. In der ionischen Naturphilosophie war das vierte Element das Feuer. Bei vielen wurde das mit der Wärme wohl identifiziert, aber bei den Männern, von denen wir nicht nur sporadische Zitate besitzen, sondern ausführlichere Abhandlungen, ist das Feuer meist nur ein Erzeuger von Wärme und letztere ist ein Zustand der Körper. Nach Platon haben wir uns den Vorgang so zu denken: Dringt das Feuer (als Element weder brennend noch leuchtend) in einen Körper ein, so macht es die kleinsten Teile beweglich und löst sie voneinander, geht das Feuer wieder hinaus, so erfolgt Abkühlung, die Luft tritt wieder an die Stelle des Feuers und drückt die kleinsten Teile wieder zusammen, so erklärt sich Ausdehnung und Kontraktion bei Erwärmung und Abkühlung (Platon, Timaios 58d). In den Lebewesen erzeugt das Feuer die Blutwärme (59) und in warm machenden Flüssigkeiten (Wein) ist auch Feuer enthalten (60). Verliert das Wasser seinen Bestand an Feuer, so wird es abgekühlt, so entsteht

in der Luft der Hagel, auf der Erde Eis und Schnee und aus dem Tau der Reif. Warm und kalt sind nicht Gegensätze, sondern nur relative Urteile (Philebos 25). Daß durch Bewegung Wärme erzeugt wird, ist von Platon und Aristoteles als allgemein bekannt bezeugt. Aber Aristoteles sagt ausdrücklich, daß die Wärme nicht aus Bewegung bestehe (Meteor XII, 11), aber der von der Sonne oder den Sternen erregte Äther erzeuge Wärme (ib. I, 19). In vielen Büchern (besonders englischen) kann man lesen, Lucretz habe die Wärme als einen Bewegungszustand der Moleküle behandelt. Das ist nicht richtig; die Verse II, 294—307, beziehen sich nur auf Mechanik und haben mit Wärme gar nichts zu tun.

Ebensowenig hat der oft genannte Gassendi (Opera omn., 1658, II) die Wärmeerscheinungen mit der atomistischen Theorie der Materie in Verbindung gebracht; er unterscheidet sogar die „kaltmachende“ Materie von der warmmachenden. Der erste, welcher wieder selbständige Gedanken über die Wärme hat, ist Roger Bacon (1214—1294), der in seinem Opus majus die „innere“ Bewegung der Körper als Ursache der Wärme ansieht, und zwar sollen es die gegeneinander gerichteten Strebungen der kleinsten Teilchen sein, welche die Wärme darstellen (Novum organ. II, 20. Aphorisma). J. Kepler betrachtet die Wärme als einen Bewegungszustand der Teile des Körpers (Nov. ast. 1609 und Strena seu de nive sexangula, 1611). Galilei dagegen steht auf dem Boden des Telesius, der in De rerum natura (1565) die Wärme als eine Art Flüssigkeit betrachtet. Die Begriffe „warm“ und „kalt“ sind mit dem anderen Gegensatz „feucht“ und „trocken“ die Fundamente der Elemente; also ganz Aristotelisch!

Ganz anders Fr. Bacon von Verulam (1561—1626): Die Wärme ist nicht eine expansive Bewegung, sondern eine vibrierende der kleinsten Teile (De interpretatione naturae, erst 1665 herausgegeben)! Auch Robert Boyle (1627—1691) faßt die Wärme als einen Bewegungszustand der Moleküle auf (The mechan. origine of heat and cold, 1665). Darin findet er auch, daß in einer Kältemischung: Schnee und Salz, die Abkühlung durch die Auflösung des Salzes herbeigeführt wird. Anders steht Newton zu der Frage. Die Wärme ist eine Schwingung des Äthers. Diese Schwingungen gehen von den Himmelskörpern aus und dringen in die Körper ein (Optice, 1704, III, quaest. XVIII, p. 280). Er fragt: Verursachen nicht die Schwingungen dieses Mittels, daß die Wärme in warmen Körpern dauerhafter und von größerer Intensität werde? Teilen nicht warme Körper ihre Wärme kalten, jenen nahe genug

kommenden Körpern deswegen mit, weil sich die Schwingungen dieses Mittels (des Äthers) aus den warmen Körpern in die kalten fortpflanzen usw.? Dagegen schließen sich Parent (Hist., Paris 1712/14, p. 96) und Hermann (Phoronomia, 1716, L. II, c. 6) der Boyleschen Auffassung an. Eine selbständige Auffassung und Begründung des Wesens der Wärme als eines Schwingungszustandes der Moleküle gibt zuerst Daniel Bernoulli in seiner Hydrodynamic 1738, sec. 10, und die gleiche Anschauung bringt er auch zur Geltung in der Pariser Preisschrift von Daniel, wie auch von Johann Bernoulli (Prix de l'acad., 1746). In demselben Jahre, als Daniel Bernoullis Hydrodynamic erschien, gewann L. Euler den für 1738 ausgesetzten Preis mit der Arbeit: Über das Feuer und seine Ausbreitung (Recueil des pièces etc., IV, 1752, p. 13). Seine Worte sind folgende: Quum enim calor in motu quodam minimarum particularum corporum consistet, satis perspicuum est: Ignem in omnibus corporibus calorem excitare debere. Alle diese Gelehrten haben also durchaus nicht auf dem Standpunkt gestanden, daß die Wärme eine Art Flüssigkeit, ein Stoff sei.

Für die Wärme einen eigentümlichen Stoff anzunehmen, war Chr. Wolff (1679—1754) vorbehalten (Allerhand nützliche Versuche, II, c. 8, 1720). Jeder materielle Körper hat zwei Arten von Poren, ganz große, die mit Luft gefüllt sind, und ganz kleine, die mit der Materie innig verbunden sind zur Aufnahme der Wärme. Im gewöhnlichen Zustand ist in dem Körper diese Wärme nicht nachweisbar, sie ist in Ruhe. Erst durch die Bewegung wird sie fühlbar. Das Inbewegungsetzen kann auf verschiedene Weisen geschehen. So erklärt sich die „latente" Wärme, so die Lösungswärme, so die Kältemischungen; hier dient die Wärme des Wassers dazu, die Kristalle, z. B. den Salpeter, aufzulösen. Die verschiedenen spezifischen Wärmen erklären sich durch die großen Verschiedenheiten der kleinen Löcher in den Körpern. Der Wärmestoff ist durchaus verschieden vom Lichtstoff und Feuerstoff, da man auch unverbrennliche und nichtleuchtende Körper sehr wohl erwärmen kann. Diese Wolffsche Anschauung wurde mit der Boyleschen Idee von einem Feuerstoff verbunden. Schon 1702 hatte Becher in seiner Phys. subteranea diese Kombination vorbereitet, ausführlich begründet hat er sie 1731 in Exper. observationes et animadversiones. Lemery nahm an, daß der Feuerstoff die Wärme, das Licht und die Veränderung des Aggregatzustandes besorge. Dem trat E. Stahl entgegen und machte den Wärmestoff, das Phlogiston, zu einem Element, welches sich in größeren oder geringeren Mengen mit der

Materie verbinden könne (Specimen Becherianum, 1703, und Zufällige Gedanken und nützliche Bedenken 1718). Stahl baute mit dem Phlogiston eine vollständige Theorie der Chemie auf (Chymica dogmatica etc., 1732). Dadurch, daß Wilkes Entdeckung der spezifischen Wärme (s. oben) mit der Wolffschen Theorie eine scheinbar bequeme Erklärung fand, wurde diese Stahlsche Fassung der Theorie sehr verbreitet.

Aber die mechanische Auffassung ist durchaus nicht ganz verschwunden. Der Zustand der Wärmelehre ist am klarsten in der großen Arbeit von Lavoisier (1743—1894) und Laplace (Mém. Paris, 1784, p. 355ff.) dargestellt. Da heißt es (p. 357): „Die Physiker sind sich über die Wärme nicht einig; mehrere von ihnen betrachten die Wärme wie ein Fluidum, welches in der ganzen Natur ausgebreitet ist, die Körper mehr oder weniger durchdringt, entsprechend ihrer Temperatur und ihrer Fähigkeit, sie zurückzuhalten. Die Wärme kann sich mit den Körpern verbinden, dann hört sie auf, das Thermometer zu beeinflussen, oder sich von einem Körper zu einem anderen verbreiten, das ist der Zustand der ‚freien Wärme'. Die anderen Physiker halten die Wärme nur für das Resultat unsichtbarer Bewegungen der Moleküle der Materie. Die leeren Räume zwischen den Molekülen gestatten diesen, nach allen Richtungen zu schwingen. Diese unsichtbare Bewegung ist die Wärme. Unter Zugrundelegung des Prinzips der Erhaltung der lebendigen Kraft kann man die Definition auch so aussprechen: Die Wärme ist die lebendige Kraft, d. h. die Summe der Produkte aus Masse jedes Moleküls mit dem Quadrat der Geschwindigkeit."

Lavoisier und Laplace (1749—1827) entscheiden sich für keine der Hypothesen; manche Erscheinungen lassen sich bequemer nach der letzten, andere nach der ersten Annahme erklären, „vielleicht sind beide richtig" (!!). Jedenfalls ist für beide Theorien folgender Satz richtig: „Die Menge der freien Wärme bleibt stets die gleiche bei der einfachen Vermischung der Körper." Und ein zweites Gesetz, welches für beide Theorien gilt, ist dieses: „Wenn in einer Verbindung oder einer Zustandsänderung freie Wärme vermindert wird, so erscheint dieselbe vollständig wieder, wenn der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt wird, und wenn eine Vermehrung eingetreten war, so verschwindet dieselbe wieder, wenn der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt wird." Diese beiden Gesetze legen sie dann ihrer weiteren Untersuchung zugrunde.

Um diese Zeit beginnt der Entscheidungskampf um das Wesen der Wärme. Ich nenne auf Seite der Wärmestofftheorie folgende

Arbeiten: Ad. Crawford, Versuche und Beobachtungen über tierische Wärme und die Entzündung brennbarer Körper, Leipzig 1785; Mayer (1752—1830), Über die Gesetze und Modifikationen des Wärmestoffs, Erlangen 1791; Gren, Grundriß der Naturlehre, Halle 1797, und Journ. d. Phys. II, p. 124. Gegen den Wärmestoff und für die mechanische Theorie der Wärme traten ein: Macquer, Chemisches Wörterbuch, Art. Feuer; Scherer, Nachtrag zu den Grundzügen der neueren chemischen Theorie, Jena 1796, p. 127; Davy, Contribution to phys. and medic. knowledge, Bristol 1799; Rumford, Phil. Trans. abr. 18, p. 283; Th. Young, Lectures on nat. phil., London 1807; Ampère, Ann. de Chim. et de Phys. 58, p. 422, 1820. Es ist also durchaus nicht so, wie man oft lesen muß, daß am Ausgang des 18. Jahrhunderts alle Physiker Anhänger des Wärmestoffs gewesen seien und erst durch Rumford und Young die Auffassung entdeckt sei, daß die Wärme in einer Molekularbewegung bestände. Daß durch Reibung Wärme erzeugt wird, war ja seit dem Altertum allbekannt. Man meinte, daß diese Wärme durch eine Änderung der spezifischen Wärme (der Wärmekapazität) entstehe.

Diese Erklärung wollte Rumford (ursprünglich: Benjamin Thompson, 1753—1814) prüfen, als er sein bekanntes Experiment in München machte. Er ließ ein Kanonenrohr, auf dessen Boden ein stumpfer Bohrer fest aufdrückte, durch Pferdekraft drehen und maß die Temperatur an einem im eingebohrten Loche des Rohres eingesetzten Thermometer, dessen Anfangstemperatur 16,7° C war. Nach 30′ (gleich 960 Umdrehungen) fand er 54,4° C. Durch den Bohrer waren 837 Gran (Apothekergewicht) abgeschält. Er erklärt es für unmöglich, „daß durch Änderung der spezifischen Wärme einer so geringen Masse die 113 Pfund Kanonenmetall eine Erwärmung um 37,7° C erfahren haben sollte“! Dann stellt er das Rohr mit dem Bohrer in Wasser, dessen Temperatur 15,6° betrug. Bald nach Beginn der Drehung konnte er Temperatursteigerung messen und nach $2^1/_2$ Stunden kochte das Wasser. Er stellt dann die Fragen: Was ist Wärme, gibt es einen Wärmestoff? Sein Schluß lautet: Ich kann mir keine Vorstellung davon machen, wenn ich sie nicht für eine Bewegung halten soll (Phil. Trans. 1798, gelesen in der Roy. Soc., Januar 25.).

Wie wenig aber diese Anschauung Zustimmung fand, mag aus der Tatsache geschlossen werden, daß Biot (1774—1862) noch in der zweiten Auflage seines Lehrbuchs 1829 erklärt: Worauf die bei der Reibung entwickelte Wärme beruht, ist noch unbekannt (deutsche Ausgabe V, p. 373). Er hält es sogar für möglich, daß durch die

Reibung Elektrizität erzeugt werde und diese die Wärme entwickle (cf. Haldat in Karstens Arch. 10, p. 66). Auch das kurze Zeit vorher erfundene pneumatische Feuerzeug hätte Rumfords Meinung stützen können, allein man sah darin sogar einen Beweis, daß die Wärme ein Stoff sei, der durch die Kompression aus der Luft herausgedrückt werde (Heinrich, Phosphoreszenz der Körper, 1811, p. 425).

Einen Fortschritt finden wir erst bei S. Carnot in Reflexions sur la puissance motrice du feu, Paris 1824. Es hängt das eng zusammen mit der Entwicklung der Mechanik. Ich habe dort gezeigt, daß Kepler bereits den Arbeitsbegriff eingeführt hat und den Namen „Energie" dafür gebraucht. Leibniz führt den Namen „lebendige Kraft" und den Satz von der Konstanz derselben ein für alle mechanischen Vorgänge. Von Euler war dann der Begriff des Potentials erfunden und durch Lagrange und Laplace verallgemeinert, bis C. F. Gauss die Potentialtheorie begründete.

Durch die Entwicklung der Dampfmaschine war J. Watt (s. oben) gezwungen, die praktische Frage, wieviel Wärme nötig ist, um eine bestimmte Arbeit zu leisten, in den Vordergrund zu schieben. Durch Gay-Lussac (s. oben) war das Townleysche Gesetz $p \cdot v =$ const unter Berücksichtigung der Ausdehnung durch die Wärme erweitert zu $p \cdot v = p_0 v_0 (1 + \alpha t)$ und $\alpha = 0{,}00375 = 1/267{,}2$ bestimmt (statt 1/273). Gay-Lussac hatte bereits 1808 (Gehlens Journ. 6, p. 392; die Originalarbeit Gay-Lussacs ist in den Mém. d'Arcueil I, 1807, p. 180, aus dem Institut von Berthollet in Arcueil veröffentlicht und daher sehr schwer zugänglich) den interessanten Versuch gemacht, aus welchem später das nach Joule genannte Gesetz abgeleitet ist, daß er zwei gleich große Räume, von denen der eine luftleer gemacht ist, miteinander verband, ließ er die Luft aus dem gefüllten Ballon in den leeren fließen, so stieg in letzterem das Thermometer um ebensoviel, als es in ersterem sank. Er zeigte ferner mit dem Breguetschen Metallthermometer, daß bei jedem Kolbenzuge der Luftpumpe eine Temperaturerniedrigung, beim Einströmen der Luft Temperatursteigerung eintritt (Biot, Préc. élém. de phys., 1817, I). Also ist das gewöhnlich Joule (1818—1889, Phil. Mag. 26, 1845, p. 369) zugeschriebene Experiment, mit welchem das Joulesche Gesetz abgeleitet wird, daß die innere Energie einer Gasmasse von konstanter Temperatur unabhängig vom Volumen ist, bereits von Gay-Lussac gefunden. Die ersten Versuche in dieser Richtung sind wohl von W. Cullen in einer Arbeit über Kälteerzeugung durch Verdampfen einer Flüssigkeit gemacht (Essays etc. of a Soc. at Edinb., II, 1755). Daß die mechanische Ausdehnung der

Luft Kälte erzeugt, wurde von E. Darwin (1731—1802) nachgewiesen (Phil. Trans. 1788 und Gren. Journ. 1790). J. Dalton (1766—1844) zeigte, daß mechanische Kondensation Hitze, Verdünnung der Luft Kälte erzeugt (Mem. Manchester 5, II, 1802, p. 515). An diese Arbeiten schließt sich dann der bekannte Versuch von Clément-Desormes (Bibl. univers. 13, p. 95, 1819, und Journ. d. Phys. 89, p. 337, 1819). Dulong hat diese Verhältnisse bei verschiedenen Gasen untersucht und folgendes Ergebnis erhalten: Alle elastischen Flüssigkeiten (Gase und Dämpfe), genommen in gleichem Volumen, bei gleicher Temperatur und gleichem Druck, entwickeln, wenn sie um den gleichen Bruchteil ihres Volumens zusammengedrückt oder ausgedehnt werden, die gleiche absolute Wärmemenge (Mém. Paris X, p. 188).

Nun erscheint die bedeutendste Arbeit dieser Entwicklungsreihe: Réflexions sur la puissance motrice du feu, 1824 von S. Carnot, in welcher er den bekannten Kreisprozeß (p. 17 in dem 1878 erschienenen Wiederabdruck) veröffentlicht. Übrigens hat Carnot noch nicht, wie oft irrtümlich gesagt wird, die isothermischen und adiabatischen Kurven bei seiner Darstellung benutzt. Das bekannte Diagramm ist erst 10 Jahre später von Clapeyron (1799—1864, Pogg. Ann. 59, p. 452, 1843) hinzugefügt. Carnot steht bei seiner Ableitung noch auf dem Standpunkt, daß die Wärme ein Stoff sei; erst in den angeführten Notizen (p. 89ff.) betrachtet er die Wärme als Molekularbewegung. Da Carnot schon 1832 starb, sind auch diese Notizen älter als Mayers Arbeit (s. unten). Aber schon in der Arbeit selbst fordert Carnot eine Relation zwischen Wärme und Arbeit. Nach ihm ist das Äquivalent der durch Wärme geleisteten Arbeit gleich dem Übergang einer Wärmemenge aus einem wärmeren in einen kälteren Körper, und ein Kreisprozeß entsteht dann, wenn die aufgenommene Wärme gleich der abgegebenen ist, so daß allgemein die gewonnene Arbeit proportional dem Wärmeverlust ist (p. 44, Anmerk.). Carnot unterscheidet dabei spezifische Wärme bei konstantem Druck und konstantem Volumen. Clapeyron sprach unter Benutzung der Gay-Lussacschen Resultate in der oben zitierten Arbeit seine Zustandsgleichung $p \cdot v / T =$ const aus. Hierher gehört auch die Arbeit von Colladon (Kastn. Arch. 10, p. 69, 1827), daß bei dem seit 1803 bekannten Du Montièrschen pneumatischen Feuerzeug die Luft auf ein Dreizehntel ihres Volumens komprimiert werden muß, um eine Zündung des Feuerschwamms zu ermöglichen, und auf ein Achtzehntel, um Schwefel zu entzünden (cf. Verh. d. allg. Schweiz. Ges. d. Naturw. 11, p. 89).

Das Wärmeäquivalent. Schon Rumford hatte aus seinen Experimenten (s. oben) berechnet, daß 1861 engl. Fußpfund Arbeit ein Pfund Wasser um 1° C erwärmten, d. h. 570,9 Kilogrammeter, aber er kam noch nicht zur vollen Erkenntnis der Äquivalenz. Nachdem jedoch R. Mayer (Lieb. Ann. 42, Mai 1842) das Prinzip von der Erhaltung der lebendigen Kraft, welches bis dahin nur auf rein mechanische Probleme angewandt war, als allgemeines Naturgesetz ausgerufen und speziell auf die Wärmeerscheinungen bezogen hatte, war es dringende Aufgabe, das mechanische Äquivalent für die Wärmeeinheit zu bestimmen. Dieser Aufgabe wandte sich Joule zu, der schon vor der Mayerschen Veröffentlichung am 17. 12. 1840 eine Arbeit über Wärmeentwicklung des galvanischen Stromes und später die Messung der durch strömendes Wasser in engen Röhren erzeugten Wärme geliefert hatte (Phil. Mag., Ser. 3, 23, p. 441, 1843). Seine Versuche, umgerechnet in Kilogramm und Meter, ergaben das Äquivalent zu 422,40 kg-m. Joule stellte nun Reibungsversuche an in Wasser und Quecksilber (ib. 27, 1845, und 31, 1847) mit dem Ergebnis 423,55. Durch Kompression der Luft (ib. 25 und 26, 1844/45) fand er 437,77 kg-m. Durch Reibung an festen Körpern bestimmte er 425,12. Die Arbeiten Joules sind von Spengel ins Deutsche übertragen unter dem Titel: Das mechanische Wärmeäquivalent, 1872.

Für die mechanische Arbeitsleistung der Dampfmaschine sind von Wert die Arbeiten von Colding (1815—1888): An examination of steam enginer etc., Copenhagen 1851, und mehrere Aufsätze in den Abhandlungen der dänischen Gesellschaft der Wissenschaften seit 1852, welche zu entsprechenden Werten des Äquivalents führten. Ähnliche Versuche stellte W. Thomson an (1850), und fand die geleistete Arbeit $A = \frac{W}{T}(T - T_1)$, wenn W die Wärme des Kessels, T seine Temperatur und T_1 die Temperatur im Kondensationsraum ist (Phil. Mag. 37, 1850, und Dyn. theorie of Heat in Phil. Mag. 4, 9, 11, 1852—1856). Es muß beachtet werden, daß in der erstgenannten Arbeit noch keine Beziehung auf die beiden Wärmetheorien genommen ist. Das tat Thomson erst in der berühmten Arbeit: On the dynamic Theorie of Heat (Trans. Edinb. 20, p. 261 u. 475, 1851) und spricht dabei (p. 265) den zweiten Wärmesatz inhaltlich mit Clausius identisch aus (s. unten). In der Arbeit von 1852 redet er dann von der Dissipation of Mech. energy (p. 304). Colding hatte 1843, unabhängig von Mayer auch das Gesetz der Erhaltung der lebendigen Kraft mit wesentlich meta-

physischer Begründung ausgesprochen und suchte dann, angeregt von Oersted, die experimentelle Begründung.

Auch aus dem Verhältnis der spezifischen Wärme eines Gases bei konstantem Druck und konstantem Volumen bzw. deren Differenz läßt sich das Äquivalent berechnen. Mayer (l. c.) fand auf diesem Wege 427 kg-m. Da die direkten Bestimmungen von c_p (spezifische Wärme bei konstantem Druck) und c_v (bei konstantem Volumen) mit vielen Ungenauigkeiten vorbelastet sind, zeigte Laplace (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. II, 3, p. 238, 1816), daß man das Verhältnis $c_p/c_v = k$ am besten aus der Schallgeschwindigkeit bestimme. Das führte Gay-Lussac aus (ib. 20, p. 267, 1822) und Poisson benutzte dessen Resultat in seiner mathematischen Ableitung der Beziehung (ib. 23, p. 337, 1823) $v \cdot p =$ const, wo v das Volumen, p der Druck ist. Daraufhin bestimmte Dulong das k aus der Geschwindigkeit des Schalles in einer Reihe von Gasen (ib. 41, 1829) und Mayer fand unter Benutzung dieser Werte das Äquivalent zu 430,4.

Bosscha (1831—1912) berechnete das Wärmeäquivalent aus der Messung elektromotorischer Kräfte (Pogg. Ann. 101, p. 517, 1857) und Quintus-Icilius (1824—1885) aus der Wärmeentwicklung eines galvanischen Stromes (ib. 101, p. 69). Sehr umfangreiche Versuche stellte Hirn (1815—1890) an, um aus Stoßwirkung bei Bleiklötzen das Äquivalent zu berechnen. Das Mittel aus sechs Versuchen war 425 kg-m (Théorie méc. de la chaleur, 2. Aufl., I, p. 54, 1859). Schon vorher hatte er auf andere Weise das Äquivalent zu bestimmen gesucht in Rech. sur l'equivalent.méc. de la chaleur, Colmar 1858). In dieser Arbeit führt Hirn, p. 8, den Namen Kalorie für die Wärmeeinheit ein, nahezu mit denselben Worten, wie sie Favre (1813—1886) und Silbermann 1852 gebraucht hatten (s. Thermochemie). Von den späteren Arbeiten zur Bestimmung des Wärmeäquivalents nenne ich noch folgende: Puluj konstruierte einen Apparat, um mit der Bremsmethode das Äquivalent in einem Vorlesungsversuch bestimmen zu können (Pogg. Ann. 157, p. 437 u. 649, 1876); Waltenhoven (1828—1914) bestimmte es durch die Induktionsarbeit einer magnetisch-elektrischen Maschine (Wied. Ann. 9, p. 81, 1880). Jahn stellte Versuche über Joulesche Wärme in Drähten an (ib. 25, p. 63, 1885), Haga aus den Temperaturänderungen gedehnter Metalldrähte (ib. 15, p. 1, 1882); Dieterici berechnete das Äquivalent aus den elektrischen Einheiten (ib. 33, p. 417, 1888). Eine sehr sorgfältige Messung durch Reibung lieferte Rowland (1848—1901) (Proc. Amer. Acad. Boston 7, p. 75, 1880);

darin gibt er eine Kritik aller Versuche. Endlich ist durch den internationalen Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen der Arbeitswert einer Kalorie bei 15^0 C zu $4,189 \cdot 10^{10}$ erg festgesetzt. Das ist bei $g_{45^0} = 9,8062$ m/sec^{-2}, für das Äquivalent folgt dann $= 427,18$ kg-m.

Der Mayersche Satz von der Äquivalenz der Wärme und Arbeit führte zur Ausbildung der mechanischen Wärmetheorie, um die Clausius (1822—1888) das größte Verdienst hat. Schon die erste Arbeit von Clausius auf diesem Gebiet enthält die beiden Hauptsätze der Theorie (Pogg. Ann. 79, p. 368, 1850). Clausius analysiert den Satz von der Äquivalenz der Wärme und Arbeit und das Prinzip der Erhaltung der Energie (lebendigen Kraft). Er unterscheidet innere Energie $U = f(v \cdot p)$ und äußere Arbeit L. Wird dem Körper die Wärmemenge dQ zugeführt, so ist $dQ = A \cdot (dU + dL)$, wo A der Wärmewert der Arbeitseinheit, p = Druck, v Volumen, dann ist $dL = p\,dv$, also der erste Hauptsatz $dQ = A\,(dU + p\,dv)$. Clausius wies ferner nach, daß die bei dem Carnotschen Kreisprozeß angenommene Gleichheit der abgegebenen und aufgenommenen Wärme nicht zulässig sei, daß aber Arbeitsleistung durch Wärme nur erfolgt, wenn sie von höherer auf niedrigere Temperatur sinkt. Daraus folgt, daß Wärme von selbst niemals von niedriger Temperatur zu höherer übergeht. Gegen verschiedene Einwände mußte Clausius besonders den zweiten Satz verteidigen und näher begründen (Pogg. Ann. 93, p. 481, 1854; 116, p. 73, 1862; 120, p. 431, 1863, und 125, p. 353, 1865). In dieser letzten Arbeit führt Clausius den Entropiebegriff ein. Ist Q_1 die Wärmemenge, welche der Wärmequelle von der absoluten Temperatur T_1 entnommen wird, die an den Körper von der Temperatur T_2 abgegebene Wärme Q_2, so ist bei einem Kreisprozeß $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$ oder, wenn man die abgegebene Wärme negativ rechnet, so ist $Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0$ oder bei stetiger Änderung $\int \frac{dQ}{T} = 0$. Ist kein Kreisprozeß vorhanden, so ist $\int \frac{dQ}{T} = S$. Diese Größe nennt Clausius Entropie. Da es wirkliche Kreisprozesse in der Natur nicht gibt, so kann der zweite Hauptsatz auch so ausgesprochen werden: Jeder in der Natur sich abspielende Prozeß verläuft so, daß die Summe der Entropien sämtlicher beteiligten Körper vergrößert wird (cf. Planck, Wied. Ann. 19, p. 358, 1884; 30, p. 562, 1887).

Clausius wurde in einen Prioritätsstreit verwickelt, indem englische Schriftsteller behaupteten, Rankine habe vor ihm die

mechanische Theorie der Wärme gefunden. Rankine hat freilich im Februar 1850 vor der Roy. Soc. in Edinburg eine Arbeit über die mechanische Theorie der Wärme vorgetragen, von der er behauptete, sie schon im Herbst 1849 fertig gehabt zu haben; sie ist publiziert in Trans. Edinb. 20, p. 147, 1851, und wieder abgedruckt in Phil. Mag. (4) 7, 1864; aber sie enthält nur den ersten Hauptsatz und nicht den zweiten. Es kommt jedoch wesentlich auf den zweiten Satz an, während der erste in gewisser Weise schon von R. Mayer ausgesprochen war.

Die Untersuchungen über den zweiten Hauptsatz haben noch viele Forscher beschäftigt. Bei manchen waren es metaphysische Gründe, welche den Widerspruch gegen den zweiten Satz erzeugten. Doch ist der Satz durch die Planckschen Arbeiten (Wied. Ann. 30, 31, 32, 44, 46, 48, 1887—1892) durchaus für die klassische Mechanik gesichert. Doch kamen bei der Diskussion einige neue Betrachtungsweisen und Begriffe zur Geltung, so daß auch hier die Diskussion nicht nutzlos gewesen ist. Ich nenne z. B. v. Öttingen (1836—1905), der den Begriff der Adiabate einführte (Pogg. Ann., Erg. 7, p. 84, 1876), aber seine Einwände gegen den zweiten Hauptsatz sind von Clausius selbst widerlegt (ib. 159, p. 387, 1876). Durch Kohlrauschs Bemerkungen veranlaßt, gab Clausius eine neue Ableitung des Satzes (ib. 160, p. 420, 1877).

Kinetische Gastheorie.

Die Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie setzen durchweg die kinetische Gastheorie voraus, die von Krönig (1822–1879) begründet (ib. 19, p. 315, 1856), von Clausius wesentlich verbessert und vertieft wurde (ib. 100, p. 355, 1857). Die Arbeiten von Clausius sind gesammelt herausgegeben in Abhandlungen zur mechanischen Wärmetheorie I u. II, 1864, und in 3. Auflage in 3 Bänden 1887—1891. Darin ist ein vollständiger Aufbau der Theorie enthalten. Daß die Grundlage der Theorie schon von D. Bernoulli 1738 gegeben war, ist p. 121 schon auseinandergesetzt.

Die Verbindung der mechanischen Wärmetheorie, speziell des zweiten Hauptsatzes, mit der kinetischen Gastheorie ist die Grundlage der elastischen Thermodynamik für die in erster Linie Plancks Untersuchungen (s. oben) maßgebend sind; sie ist auch die Grundlage für die Aufstellung von Zustandsgleichungen. Nachdem man früher Gase und Dämpfe streng unterschieden hatte, war schon durch Gay-Lussac (s. oben) darauf aufmerksam gemacht, daß

„trockener“ Wasserdampf sich genau so verhalte wie die Gase und auch dem Boyleschen Gesetz gehorche, bzw. dem Clapeyronschen $p \cdot v = R \cdot T$ unterworfen ist. Andererseits war durch die Arbeiten von Cagniard de la Tour: Exposé de quelques résultats obtenues par l'action combinée de la chaleur et de la compression sur certaines liquides etc. (Ann. de Chim. et de Phys. 21, 1822; 22 u. 23, 1823) gezeigt, daß Gase, speziell Kohlensäure, bei genügender Temperatur und erhöhtem Druck flüssig werden. Die gleiche Erfahrung machte Faraday etwas später an Chlor und anderen Gasen (Phil. Trans., 2. Abhandl., 1823). Er suchte bereits 1826 (Phil. Trans.) nach einem Grenzwert der Verdampfung und Kondensation (kritischer Temperatur), wie seine Versuche mit Kampferdampf an die Hand geben (Ann. of Phil., N. S., 12, p. 436, 1829). Faraday kam 1845 in der Arbeit On the liquefaction and solidifaction of bodies generaly existing as gases (Phil. Trans.) auf die Frage zurück und spricht darin die Meinung aus, daß alle Gase kondensiert werden können, wenn es ihm auch bei einigen nicht gelungen sei, auch die permanenten Gase, und daß man dann „den Wasserstoff als Metall“ erhalte (cf. Pogg. Ann., Erg. 2, 1848, p. 193, und 64, p. 467, 1845). In der gleichen Richtung arbeitete Natterer, welcher eine allgemein anwendbare Methode bekannt gab und zunächst an Kohlensäure und „Stickgasoxydul“ bewährte (Wien. Ber. 5, p. 351, 1850; 6, p. 557, 1851; 12, p. 199, 1854). Natterer ging bis auf 2790 Atm. Druck und fand bei diesen Versuchen, daß alle Gase, auch Wasserstoff, Sauerstoff und Luft bei sehr hohen Temperaturen Abweichungen vom Townley-Gay-Lussacschen Gesetz zeigen. Auch Amagat (1841—1915) hat seit 1873 diese Frage studiert in zahlreichen Versuchen und ging bis zu 3000 Atm. (C. R. 111, p. 871, 1890). Andrews (1813—1885) behauptete, daß ein kontinuierlicher Übergang vom gasförmigen Zustand in den flüssigen vorhanden sei (Phil. Trans. 159, p. 1869, und Pogg. Ann., Ergb. 5, p. 64, 1871). Dabei fand er das wichtige Gesetz, daß Kohlensäure oberhalb einer bestimmten Temperatur, der kritischen Temperatur = 30,92° C, nicht mehr verflüssigt werden kann. Von Cailletet (1832—1905) (C. R. 70, p. 1131, 1870) wurde für alle Gase eine solche kritische Temperatur verlangt und hinzugefügt, daß es oberhalb dieser Temperatur einen Druck gibt, bei welchem die Komprimierbarkeit ein Maximum wird. Oberhalb dieses Druckes verhalten sich alle Gase wie Wasserstoff. Für diesen Übergang hatte Rankine eine allgemeine Formel für Druck und latente Wärme aufgestellt (Phil. Mag., Ser. 4, 8, 1854); jedoch entsprach diese Gleichung nicht der

Wirklichkeit. Dagegen hat Clausius die Aggregatzustände mechanisch erklärt (Pogg. Ann. 100, p. 355, 1857).

Die Abweichungen vom Townleyschen Gesetz hat zuerst Oerstedt festgestellt (Gehlens Journ. I, p. 276, 1806). Die ausführliche Untersuchung mit gutem Resultat findet sich in Edinb. Journ. 4, p. 224, 1827, wo er schwefligsaures Gas mit 3,2689 Atm. bei 21,25° C flüssig werden sah und Cyangas bei Volumenverminderung auf das 1/3,5fache seines Anfangsvolumens flüssig wurde. Despretz (1792 bis 1863) verglich verschiedene Gase mit Luft in bezug auf Komprimierbarkeit mit einem Apparat, ähnlich dem Oerstedtschen Piezometer. Zwei Röhren mit den zu vergleichenden Gasen gefüllt wurden durch eine Wassersäule auf gleichen Druck gebracht. Es zeigte sich, daß schweflige Säure, Cyan, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Kohlensäure stärker zusammengedrückt wurden als Luft (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 2, 34, p. 335 u. 443, 1827). Von Pouillet wurden diese Resultate bestätigt und hinzugefügt, daß bis zu 100 Atm. Druck die Gase O, N, H, NO, CO das gleiche Kompressionsgesetz wie die atmosphärische Luft befolgen (Élém. de Phys., 4. Aufl., p. 327, 1873). Durch die sorgfältigen Untersuchungen Regnaults (Mém. Paris 21 u. 26, 1847) wurde das Resultat festgestellt, daß bei mittlerer Temperatur für Druckkräfte zwischen 1 und 30 Atm. alle Gase, mit Ausnahme von H, mehr zusammendrückbar sind, als das Townleysche Gesetz fordert, H dagegen weniger stark.

Ein neuer Gedanke findet sich in der Untersuchung von Regnault über Kohlensäure (C. R. 20, p. 975, 1845). Bei 0° C hat sie auch bei niedrigen Drucken starke Abweichungen, aber bei 100° C Übereinstimmung. Daraus schließt er, daß es wohl bei allen Gasen einen Temperaturbereich gebe, in welchem sie sich wie ideale Gase verhalten. Avenarius (1835—1895) zeigte nun, daß für alle Gase eine solche kritische Temperatur vorhanden sein muß, nämlich bei der Temperatur, wo zur Überführung aus dem flüssigen in den gasförmigen Zustand keine innere Arbeit mehr zu leisten ist (Pogg. Ann. 151, p. 303, 1874).

Den Regnaultschen Gedanken griff Mendelejeff (1834—1923) wieder auf (Pogg. Ann. 141, p. 625, 1860) und leitete aus dem Kohäsionskoeffizienten $a^2 = A - Bt$ ab, daß für alle Flüssigkeiten Temperaturen existieren müssen, wo sie bei jedem beliebigen Druck gasförmig bleiben. Diese Temperatur nennt er die „absolute Siedetemperatur" und bestimmt sie für eine Reihe von Flüssigkeiten, z. B. Wasser zu 543° C, Alkohol 249° C usw. Die Mendelejeffsche absolute Siedetemperatur nennt Andrews: the critical

point (Phil. Mag. 4, 39, p. 150, 1870). Er hatte ein Jahr früher die Behauptung aufgestellt, daß allgemein zwischen flüssigem und gasförmigem Zustand ein kontinuierlicher Übergang stattfinde (Phil. Trans. 159, 1869).

Obwohl demgegenüber Mendelejeff die scharfe Trennung der beiden Aggregatzustände betonte (Pogg. Ann. 134, p. 619, 1870), hat doch die Erkenntnis der Abweichung vom Gay-Lussacschen Gesetz und der Wunsch nach Vereinheitlichung des Naturgeschehens die Versuche, eine allgemeine Zustandsgleichung herzustellen, angeregt. Neben dem schon erwähnten mißlungenen Versuch von Rankine ist zunächst die Dissertation von Th. Reye, Göttingen 1861 (Pogg. Ann. 116, p. 424, 1862) zu nennen. Er geht von der mechanischen Wärmetheorie aus und setzt an die Stelle der Clapeyronschen Gleichung $p \cdot v = R \cdot T$ die neue Beziehung:

$$\frac{p}{1 + \pi \cdot p}(v + RS) = R(a + t),$$

wo π, R, S, a Konstante sind. Er zeigt dabei, daß der Druck als Funktion der inneren Arbeit und $(c_p - c_v)$ behandelt werden kann. Die Unzulänglichkeit dieses Gesetzes veranlaßte Recknagel, eine andere Zustandsgleichung aus der Krönigschen Theorie abzuleiten: $p \cdot v = A_0 (1 + \alpha t)\left(1 - \frac{B_t}{v}\right)$; A_0 und α sind Konstante; B_t eine reine Temperaturfunktion.

Da erschien 1873 die Dissertation von van der Waals: De continuiteit v. d. vloeibaren & gasvormigen toestand, Leiden 1873 (deutsch von Roth, Leipzig 1881) und brachte die Zustandsgleichung $\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = C = R\,T$, die bis in die moderne Physik Bedeutung behalten hat. Aus den zahlreichen Arbeiten, die sich in der folgenden Zeit mit dieser Gleichung beschäftigen, nenne ich nur einige, ich hoffe die wichtigsten. Zunächst hat Clausius durch genaue Untersuchung des Verhaltens der Kohlensäure nachgewiesen, daß in der Nähe der kritischen Temperatur auch die Abweichungen von der Zustandsgleichung groß werden (Wied. Ann. 9, p. 337, 1880). Er fand für Kohlensäure die Zustandsgleichung $P = R\frac{T}{v - \alpha} - \frac{c}{T \cdot (v + \beta)^2}$ mit den Konstanten R, c, α, β. Nahezu gleichzeitig formte van der Waals (1837—1923) seine Gleichung auch um, damit sie auch für den flüssigen Zustand passe (Onderzoeking omtret de overlenstemmande eigenschoppen etc., Amsterdam 1880). Jedoch auch diese wie auch die Claususche versagen bei Anwendung auf Wasserdampf, wie Clausius selbst nachwies (Wied. Ann. 14, p. 279, 1881).

Andererseits erwies sich die Zustandsgleichung als sehr wertvoller Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen. So in der Arbeit von F. Roth (ib. 11, p. 1, 1880), von Planck (ib. 13, p. 535, 1881) zur Feststellung des Sättigungsgesetzes. Clausius selbst hat dann nach Beobachtungen an Äther seine Gleichung umgeformt (ib. 14, p. 282 u. 692, 1882) und leitete aus derselben eine Bestimmung des Dampfdrucks und der Volumina von Dampf und Flüssigkeit ab.

Aus der mechanischen Wärmetheorie hat dann A. Ritter (1826 bis 1918) auch die Theorie adiabatischer Zustandsänderungen speziell für Luft begründet (ib. 37, p. 44 u. 633, 1889, und 40, p. 356, 1890). In allen diesen Arbeiten wird die Temperatur stets vom absoluten 0° an gerechnet. Dieser ist zuerst von Dalton (Mem. of the lit. Soc. Manchester 1802, p. 601) vorgeschlagen und richtig begründet als die Temperatur, bei welcher der Druck des Gases = 0 ist. Es ist also zu derselben Zeit, als Gay-Lussac seine berühmte Gleichung fand, der Begriff des absoluten Nullpunktes abgeleitet und vorgeschlagen, nach einer solchen absoluten Temperaturskala zu messen. In der Arbeit: On the zero of temperature (Nichol. Journ. 5, 1802) hat Dalton auch die Idee ausgesprochen, die Temperaturskala nicht in arithmetischer Reihe einzurichten, sondern in geometrischer, d. h. von Stufe zu Stufe um einen konstanten Bruchteil des bisherigen Volumens fortzuschreiten. Er konstruierte danach die Temperaturkurve durch die beiden festen Punkte Schmelz- und Siedepunkt des Wassers. Beide Vorschläge Daltons blieben unbeachtet. Die Idee des absoluten Nullpunktes tauchte wieder auf in einer Arbeit von Person (C. R. 33, p. 337, 1847), aber nicht in Anlehnung an die Gay-Lussacsche Gleichung, sondern von der latenten Wärme ausgehend. Daher ist sein Zahlenwert — 160° C auch so gründlich verkehrt. Aber die Einführung der absoluten Temperaturskala wurde nun weiter behandelt und W. Thomson ergänzte diesen Vorschlag noch dahin, daß er eine absolute thermodynamische Temperaturskala vorschlug (Phil. Mag. 4, 1852; 9, 1855 und 11, 1856). Doch hat dieselbe keinerlei Anwendung, soviel ich weiß, gefunden, während die Temperatur vom absoluten Nullpunkt zu messen dauernd beibehalten ist. In einer Arbeit Koppes (Pogg. Ann. 151, p. 643, 1874), die sich in wenig fruchtbarer Weise mit dem absoluten Nullpunkt beschäftigt, ist aber ein Gedanke zum ersten Male ausgesprochen, daß nämlich dieser Nullpunkt praktisch nie erreichbar sei. Durch Untersuchungen von Nernst, die schon über die Zeitgrenze dieses Buches hinausragen, ist festgestellt, daß die spezifische Wärme bei tiefen Temperaturen mehr und mehr

abnimmt, daß ebenfalls die Entropie bei Annäherung an den Nullpunkt sich der Null nähert. Das führte Nernst zur Aufstellung des dritten Wärmetheorems (1908), welches eine umfassende Darstellung und Begründung fand in Bull. Soc. Franc. de Phys. 1910, p. 19, und Journ. de phys. (4) 9, p. 21, 1910.

Thermochemie.

Wärmeeinheit.

Die uralte Erfahrung, daß beim Verbrennen eines Körpers Wärme entwickelt wird, mußte dazu führen, daß, nachdem erkannt war, daß Verbrennen nichts anderes ist als ein chemischer Prozeß, man nun untersuchte, in welchem Zusammenhang chemische Vorgänge mit der Wärme stünden. Schon O. v. Guericke hatte nachgewiesen, daß die Flamme aus der Luft einen Stoff aufnimmt (Nova exper., p. 90) und Boyle hatte gezeigt, daß die „Verkalkung“ des Bleies darin bestehe, daß das Blei aus der Luft einen Bestandteil herausnehme (s. oben). Als nun Lavoisier (Mém. Paris 1781, p. 448) nachwies, daß diese Substanz der Sauerstoff sei, und die Wärme dadurch erzeugt würde, daß eine Verbindung entstehe, war die Bahn frei und Anregung gegeben, die bei der Verbrennung erzeugte Wärme zu messen. Dazu bedurfte man einer Wärmeeinheit, und diese war schon durch die Untersuchungen von Black (s. oben) und Wilke (s. oben) bei der Mischungsmethode und Schmelzwärme gegeben als diejenige Wärme, welche die Gewichtseinheit Wasser um 1° Temperatur erhöht. Black arbeitete mit Fahrenheitsskala, Wilke mit Celsius. Bei Wilke ist also die Wärmeeinheit diejenige Wärmemenge, welche die Gewichtseinheit Wasser um 1° C erwärmt. Es war natürlich, daß die Franzosen als Einheit des Gewichts 1 g nahmen, daher definiert Dulong (1785—1838; Pogg. Ann. 45, p. 465, 1838, und C. R. 7, p. 874) die Einheit der Wärme als diejenige, welche 1 g H_2O um 1° C erwärmt. Aber weder er noch einer derer, die vor ihm und mit ihm an dem Problem gearbeitet haben, haben für diese Wärmeeinheit einen besonderen Namen. Auch Heß (Ostw. Klass. 9 in seinen Arbeiten von 1839 bis 1842) gebraucht nur die Dulongsche Bezeichnung. Den Namen Kalorie finde ich zuerst bei Favre und Silbermann (Ann. de Chim. et de Phys. (3) 34, p. 385, 1852): Nous répétons que l'unité, que nous avons adoptée est celle adoptée par tous les physiciens, c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 g d'eau de 1 degré et que l'on appelle unité de chaleur ou calorie. Sehr langsam

hat sich der Name Kalorie eingeführt, so daß Hirn (s. oben) den Namen 1858 noch mit nahezu den gleichen Worten in seiner Arbeit einführen konnte. Einer allgemeinen Einführung stand natürlich die Verschiedenheit der Gewichtseinheiten in den verschiedenen Ländern hindernd im Wege, so daß wir die allgemeine Bezeichnung Kalorie erst erwarten können nach Einführung des CGS-Systems. Daß bei den meisten Messungen die Verschiedenheit der spezifischen Wärme bei verschiedener Temperatur eine störende Rolle spielt, war natürlich schon lange erkannt. Darum mußte genau angegeben werden, bei welcher Temperatur die Einheit zu bestimmen sei. So gebrauchte man neben der sogenannten kleinen Kalorie, d. h. die Wärme, welche 1 g H_2O von 0° auf 1° C erhöht, die mittlere Kalorie, d. h. den 100. Teil der Wärme, welche 1 g H_2O von 0° auf 100° erhöht, und die große Kalorie, d. h. die Wärme, welche 1 kg von 0° auf 1° C erhöht. Um die Unsicherheit der spezifischen Wärmemessung für Wasser zu vermeiden, haben Schuller und Wartha (Wied. Ann. 2, p. 359, 1877) vorgeschlagen, da die „mittlere" spezifische Wärme des Wassers sehr genau bestimmt ist, die Wärmeeinheit so zu wählen, daß es die Wärme ist, welche 1 g H_2O von 0° auf 100° erwärmt. Diese Kalorie wird nach Plancks Empfehlung gewöhnlich mit K bezeichnet (Planck, Grundriß der Thermochemie, p. 58, 1893).

Verbrennungswärme.

Die von Lavoisier (s. oben) so glücklich in Beobachtung gestellten Verbrennungsversuche fanden viel Nachahmung, wodurch eine große Zahl Verbrennungswärmen gefunden wurden; ich nenne als besonders erfolgreich Davy (Elements of chemical Philos., p. 94, 1812), Dulong (Pogg. Ann. 45, p. 462, 1838, und posth. Ann. de Chim. et de Phys. (3) 1, p. 440, 1841). Während Lavoisier mit Eiskalorimeter arbeitete, wandte Dulong ein besonderes Wasserkalorimeter an. Immerhin waren die ersten Versuche wegen der unzulänglichen Apparatur nicht ausreichend genau und bisweilen wurden spezielle Resultate ohne hinreichende Prüfung verallgemeinert zu Lehrsätzen, die sich dann als unzutreffend erwiesen, z. B. wollte man aus Dulongs Versuchen das Gesetz ableiten, „daß die Verbrennungswärme eines zusammengesetzten Stoffes = der Summe der Verbrennungswärme seiner Bestandteile sei". Aber Heß (Pogg. Ann. 52, p. 114, 1841) hat in einem Briefe an Arago bereits das Gegenteil begründet, nämlich: Ein zusammengesetzter Brennstoff entwickelt immer weniger Wärme als seine Bestandteile einzeln

genommen. Die Verbrennungswärmen von Gasen sind besonders von Andrews untersucht (Pogg. Ann. 75, p. 27, 1848), indem er das Gasgemisch im Kalorimeter durch elektrische Zündung verpuffte. Sehr viel vollkommener in Anordnung und Durchführung als die vorangehenden Versuche sind die Arbeiten von Favre und Silbermann (Ann. de Chim. et de Phys. (3) 34, p. 357, 1852). Sie wenden dabei das von Heß (Pogg. Ann. 50, p. 385, 1840) aufgestellte Prinzip der sukzessiven Wärmen an, d. h. für eine Verbindung ist die entwickelte Wärmemenge konstant, auf welchem Wege, ob direkt oder indirekt, diese Verbindung entsteht, ist gleichgültig. Bei den zahlreichen Versuchen kommen sie auch zu einem Stoff, wo sie zum ersten Male bei einer Verbindung (Schwefelkohlenstoff) eine Wärmeabsorption finden; sie finden dann auch mit gleicher Eigenschaft der Absorption den Methylalkohol und das Äthylen. Ihren Lehrsatz bewähren sie an der Verbrennung der Kohle zu Kohlensäure, das eine Mal direkt, das andere Mal, indem sie erst Kohlenoxyd und daraus Kohlensäure entstehen lassen. Allgemein gilt der Satz, daß die Verbrennungswärme gleich der Energiedifferenz der Substanzen vor und nach der Verbrennung ist. Auf Grund dieses Satzes und unter der Annahme, daß die Energie der Verbindung dem Molekulargewicht direkt, dem spezifischen Gewicht umgekehrt proportional sei, hat Nordenskiöld (1832—1901, Pogg. Ann. 109, p. 184, 1860) versucht, aus den Beobachtungen von Favre und Silbermann für die Verbrennungswärmen organischer, flüssiger Verbindungen eine allgemeine Formel abzuleiten, welche gestatten sollte, auch für sonst unzugängliche Körper die Energie zu bestimmen. Eine von Wüllner (1835—1908) ausgeführte Vergleichung gab eine annähernde Übereinstimmung, doch ist diese Anregung meines Wissens ohne Folgen geblieben.

Hatte sich im allgemeinen gezeigt, daß die Oxydation mit einer starken Wärmeentwicklung verbunden war, so daß hin und wieder die Wärmeerzeugung direkt als Maß der Sauerstoffaufnahme benutzt wurde, so war doch schon durch Thenard (1772—1857) im H_2O_2 ein Körper gefunden, der bei seiner Zersetzung, d. h. bei Abgabe des O Wärme entwickelte (Mém. Paris 3, p. 385, 1820) und nach den Messungen von Favre und Silbermann (Ann. de Chim. et de Phys. [3] 36, p. 5, 1852) entwickelt jedes abgegebene Gramm O die Wärmemenge 1363 Einheiten. Ein Pendant hierzu hatte Dulong (l. c.) im Stickstoffoxydul (N_2O) gefunden, da die Verbrennung von Kohle in diesem Gase mehr Wärme liefert als in Sauerstoff. Auch diese Zersetzung untersuchten Favre und Silbermann; sie

glaubten die positive Wärmeentwicklung durch die Volumenkontraktion des Sauerstoffs erklären zu können, der beim Ausscheiden aus der Verbindung und Eintreten in den freien Zustand auf die Hälfte seines Volumens herabfalle.

Chemische Prozesse.

Neben der Untersuchung der Verbrennungswärmen, die sich auch für die spätere Zeit als die zuverlässigste Methode bewährt hat (s. unten), sind aber auch die anderen chemischen Vorgänge bei Zersetzung und Bildung von Verbindungen untersucht. In erster Linie sind hier die Untersuchungen von Heß (1802—1850) zu nennen, dessen Arbeiten außer in Bull. der Petersburger Akademie in Pogg. Ann. von 1839—1842 erschienen sind. Außer dem oben schon erwähnten Gesetz der sukzessiven Wärmen findet er das für viele Verhältnisse gültige Gesetz der Thermoneutralität: Wenn zwei Lösungen neutraler Salze von gleicher Temperatur durch gegenseitige Zersetzung zwei neue Salze erzeugen, so ändert sich die Temperatur nicht. Dann stellt er den Satz auf, daß die mächtigste Base die ist, welche bei ihrer Verbindung die meiste Wärme entwickelt. Die von Heß gemeinte Allgemeingültigkeit ist freilich nicht bewährt, aber für viele Fälle ist sie zutreffend (Pogg. Ann. 52, p. 97, 1841). Für die Neutralisationswärme haben Favre und Silbermann (1806—1865) den Heßschen Satz so abgeändert: Die Neutralisationswärme bei Bildung eines löslichen Salzes setzt sich aus zwei Gliedern zusammen, von denen das eine nur von der Natur der Base, das andere nur von der der Säure abhängt (Ann. de Chim. et de Phys. 37, p. 406, 1853). War bei der Verbrennungswärme der Sauerstoff charakteristisches Merkmal, so untersuchten Andrews (Pogg. Ann. 75, p. 27, 1848) und Favre und Silbermann (Ann. de Chim. et de Phys. 34, 1852) auch die Chlorverbindungen. Letztere benutzten dann den Chlorwasserstoff, Jodwasserstoff usw., um die bei Bildung von Jod-, Chlor-, Brom-, Schwefelverbindungen entwickelten Wärmemengen zu bestimmen und eine Gesetzmäßigkeit in dem Verhältnis dieser Verbindungen herzustellen. Zu dem Zwecke beziehen sie die Wärmeentwicklung auf die Gewichtsäquivalente der Stoffe; das nennen sie Wärmeäquivalent, ein Ausdruck, der schon von Heß in etwas anderem Sinne gebraucht war, der aber in beiden Fällen mit dem mechanischen Wärmeäquivalent nichts zu tun hat. Sie finden dann das Resultat, daß die beständigste Verbindung die ist, welche die größte Wärmeentwicklung liefert.

Nun setzen die Arbeiten von Julius Thomsen (1826—1919) ein (Pogg. Ann. 88, p. 349, 1853), die der Thermochemie eine außerordentliche Entwicklungszeit gaben. Diese erste Arbeit ist wesentlich theoretisch und grundlegend. Die Fundamentalsätze sind: 1. Die Intensität der chemischen Kraft eines Körpers ist bei konstanter Temperatur konstant, und 2. Die bei einer chemischen Wirkung erzeugte Wärmemenge ist ein Maß für die dabei wirksame chemische Energie. Thomsen führt hier den Begriff Wärmetönung für eine Reaktion ein, und zwar positive, wenn Wärme entwickelt wird, negative, wenn Wärme absorbiert wird, und bezieht dieselbe auf die Gewichtsäquivalente der Stoffe. Die in einer Verbindung enthaltene chemische Energie (er sagt Kraft) nennt Thomsen das thermodynamische Äquivalent. Mit Hilfe dieses Begriffes kann er nun folgendes Gesetz aussprechen: Wenn die Summe der thermodynamischen Äquivalente der Bestandteile der zu bildenden Verbindung größer ist als das thermodynamische Äquivalent der fertigen Verbindung, so entsteht bei Ausführung der Verbindung Wärmeentwicklung, im entgegengesetzten Falle Wärmeabsorption.

Thomsen hat dann in einer langen Reihe von Abhandlungen, die teils in Pogg. Ann., teils in dem Journ. f. prakt. Chem. erschienen, und in den Untersuchungen, die unter dem Titel Thermochemische Untersuchungen seit 1882 in vier Bänden herausgegeben sind, die Wärmetönung für sehr viele Verbindungen gemessen. Es würde zu weit führen, hier darauf einzugehen; ich verweise auf die Lehrbücher der Chemie, speziell Ostwald, Allgemeine Chemie, und Planck, Thermochemie 1893. Nur einige auch das physikalische Interesse mehr beanspruchende Arbeiten seien noch erwähnt. Zunächst zeigte Kirchhoff 1858, daß die Wärmetönung von der Temperatur abhängig sei (Ges. Abhandl., p. 480). Thomsen versucht, die „Verwandtschaftslehre“ zu ersetzen durch eine thermochemische Bedeutung. Er kommt zu dem Satze: Jede einfache oder zusammengesetzte Wirkung von rein chemischer Natur ist von einer Wärmeentwicklung begleitet. Die Affinität, welche eine Verbindung zusammenhält, muß bei Zersetzung durch eine Kraft überwunden werden, die der Wärmetönung entspricht, welche bei der Entstehung der Verbindung sich ergab. Berthelot (Ann. de Chim. et de Phys. [5] 4, p. 5, 1875) wollte die chemische Verwandtschaft durch folgenden Satz ersetzen: Jede chemische Änderung, die sich ohne Mitwirkung einer äußeren Energie vollzieht, strebt nach der Bildung des Körpers oder des Systems von Körpern, welches die meiste Wärme entwickelt. — Dieser Satz hat aber nur beschränkte Gültigkeit.

Nicht von thermochemischen, sondern von atomistischen Vorstellungen gingen Guldberg und Waage aus, um die Verwandtschaftslehre zu ersetzen (Études sur les affinités chim., Christiania 1867). Soll ein chemischer Gleichgewichtszustand bestehen, so müssen die Kräfte je zweier einander entgegenwirkender Prozesse gleich groß sein, und diese Kräfte sind proportional den Mengen der Substanzen in Äquivalenten und einer Konstanten, welche von der Beschaffenheit des Prozesses abhängt. Ein Fortschritt in dieser Richtung wurde erst erreicht, als man nicht nur den ersten Satz der mechanischen Wärmetheorie auf chemische Prozesse anwandte, wie das bei allen Untersuchungen über Wärmetönung (besonders bei Thomsen und Berthelot, 1827—1907) geschah, sondern auch den zweiten Hauptsatz benutzte, d. h. die Entropie bestimmte.

Zum ersten Male hat wohl Horstmann (1842—1923) den zweiten Hauptsatz rechnerisch bei der Verdampfungswärme des Salmiaks angewendet (Ber. Deutsch. chem. Ges. 1869, p. 137) und ausführlicher in den Anwendungen auf einige Zersetzungserscheinungen (Ann. Chim. Pharm., Suppl. 8, p. 112, 1872). Inzwischen hatte Peslin (Ann. de Chim. et de Phys. [4] 24, p. 215, 1871) die Bildungswärme des kohlensauren Kalks aus der Änderung der Maximaltension mit der Temperatur berechnet. Horstmann ging auch von der Entropie aus, um die chemischen Gleichgewichtssätze aufzustellen, die er in seiner Arbeit über Dissoziation brauchte (Ann. Chim. Pharm. 170, p. 142, 1873), und zwar zwei Jahre früher vor Lord Rayleigh (1842—1919). Horstmann formulierte dann diese Bedingung 1881 (Ber. Deutsch. chem. Ges., p. 1242)so: In einem System chemisch aufeinander wirkender Stoffe tritt Gleichgewicht hinsichtlich der chemischen Wirkungen ein, wenn die Entropie des Systems so groß geworden ist, als sie durch die möglichen chemischen Wirkungen überhaupt werden kann.

Setzt man ein vollkommenes Gas voraus, so ist nach Clausius (l. c.) seine Energie $U = c_v \cdot T$ (c_v = spezifische Wärme bei konstantem Volumen); führt man von außen Wärme Q zu, so ist für ein Zeitelement $dQ = c_v dT + \frac{p dv}{A}$ (A = mechanisches Wärmeäquivalent) oder, da $p \cdot v = R \cdot T$ ist, $dQ = c_v dT + \frac{R T dv}{A \cdot v}$. Für adiabatische Zustandsänderung, d. h. $dQ = 0$, ist also $c_v \log T + \frac{R}{A} \log v = \text{const.}$ Dann ist die Entropie des Gases

$$S = c_v \log T + \frac{R}{A} \log v + \text{const}$$

und bleibt bei dieser Zustandsänderung konstant. Wird Wärme zugeführt, so ist $dS = \frac{dQ}{T}$ und der zweite Hauptsatz sagt dann aus, daß dieser Wert, wenn für dQ der obige Wert eingesetzt wird, $dS - \frac{dU}{T} - \frac{pdv}{AT} > 0$ ist für alle irreversiblen Vorgänge, $= 0$ für alle reversiblen. Diese Gleichung ist der Ausgangspunkt für die folgenden Untersuchungen.

W. Gibbs (Thermodynamische Studien, deutsch von Ostwald, 1892) untersuchte (1876) damit die Diffusion zweier Gase mit dem Resultat: Die Entropie eines Gasgemisches ist gleich der Summe der Entropien der Einzelgase, wenn diese bei derselben Temperatur das ganze Volumen der Mischung einnehmen. Dann wendet sich Gibbs (1839—1903) zur Betrachtung irgendeines Körper systems, welches durch beliebige chemische Eigenschaften charakterisiert ist und spricht für die Zustandsänderungen die beiden Sätze aus: Bei konstantem Volumen und konstanter Energie wächst die Entropie. Bei konstantem Volumen und konstanter Entropie nimmt die Energie ab. Er führt dann den Begriff der Phase ein, womit er den inneren Zustand eines homogenen Körpers mit Temperatur und Druck umfassen will. Bilden solche Körper ein System, so ist dessen Zustand durch die Phasen und Massen der einzelnen Körper bestimmt. In einem System besteht Gleichgewicht, wenn die Variation des eben gegebenen Ausdrucks $= 0$ ist, d. h. $\delta S - \frac{\delta U}{T} - \frac{p\delta v}{AT} = 0$. Mit Hilfe dieser Beziehung leitet Gibbs dann seine berühmte Phasenregel ab (l. c.), daß, wenn n voneinander unabhängige chemische Körper in dem System vorhanden sind, nicht mehr als $n + 2$ Phasen koexistieren können. Diese Phasenregel hat sich als sehr fruchtbar erwiesen und ist vielfach bestätigt. Ich nenne die Arbeiten von Roozeboom (Ztschr. f. phys. Chem. 2, p. 449 u. 513, 1888; 4, p. 31, 1889; 5, p. 198, 1890; 8, p. 504, 1891) und die von Planck (Wied. Ann. 15, p. 446, 1882; 19, p. 358, 1883; 32, p. 483, 1887) und von van't Hoff (Ztschr. f. phys. Chem. 1, p. 481, 1887). Sie enthalten die Probleme der Mischkristalle, der Diffusion, der Dissoziation, der verdünnten Lösungen.

Besonders Interesse fand die Behandlung der Gleichgewichtszustände verdünnter Lösungen, wenn es sich um Elektrolyten handelt, wo die Arrheniussche Dissoziationstheorie (Ztschr. f. phys. Chem. 1, p. 631, 1887) die Hinzufügung elektrischer Glieder an die Hand gab. Das hat Planck zuerst behandelt (Wied. Ann. 44, p. 385, 1891) und Nernst (Ztschr. f. phys. Chem. 9, p. 140, 1892). Ar-

rhenius zeigte selbst (ib. 2, p. 491, 1888), daß die van't Hoffschen Gesetze (l. c.) über Gefrierpunktserniedrigung, Siedepunktserhöhung usw. auch für Elektrolyten ihre Gültigkeit behalten, wenn man die Dissoziation berücksichtigt. Auf die vielen Untersuchungen spezieller Fälle, wie sie von Arrhenius, Ostwald, Nernst, Noyes und anderen in der Ztschr. f. phys. Chem. behandelt sind, darf ich hier nur kurz hinweisen.

Ist durch die vorstehend genannten Untersuchungen die Frage nach dem Gleichgewicht gelöst, so ist auch durch die Anwendung des zweiten Hauptsatzes der Affinität (Verwandtschaft) eine präzise Formulierung gegeben. Helmholtz hat (Ber. d. Berl. Akad., 2. Febr. 1882) den zweiten Hauptsatz in der Form ausgesprochen, daß bei konstantem Volumen und konstanter Temperatur die Größe $S - U/T$ wächst oder $U - S \cdot T$ abnimmt. Diesen Ausdruck nennt er die freie Energie. Wenn also ein chemischer Prozeß bei konstanter Temperatur ohne äußere Arbeitsleistung vor sich geht, so daß nur die Affinität wirksam ist, so ist die Abnahme der freien Energie das Maß für die Affinität und man kann nach van't Hoff (Ztschr. f. phys. Chem. 3, p. 608, 1889) die Affinität in Kalorien berechnen. Ist dagegen T und p konstant, so muß nach Duhem (Le potentiel thermodynamique, 1886) das thermodynamische Potential $U - TS + \frac{p \cdot v}{A}$ abnehmen. Dann ist also die wirklich gelieferte äußere Arbeit kleiner als die Abnahme der freien Energie.

3. Optik.

Älteste Zeit.

Über die ersten Forschungen auf dem Gebiete der Optik sind wir nicht durch literarische Zeugnisse unterrichtet, wenigstens ist bisher noch nichts über sumerische und ägyptische Physik veröffentlicht worden. Aber aus Bildwerken und Anwendungen der Optik können wir einiges schließen. Aus den astronomischen Leistungen in Altbabylon, wo man die Finsternisse doch schon recht frühzeitig, mindestens um 2000 v. Chr., wesentlich richtig erfaßt hatte, dürfen wir schließen, daß den Babyloniern die geradlinige Ausbreitung der Lichtstrahlen bekannt war. Aus Bildwerken, die bis 4000 v. Chr. zurückdatiert werden, ergibt sich ferner, daß ihnen die Perspektive vertraut war. Weiteres können wir nicht nachweisen. Ebenso dürftig ist das Ergebnis bei den Ägyptern.

Auch sie kannten die geradlinige Ausbreitung der Lichtstrahlen, denn aus der Schattenlänge der Pyramiden maßen sie die Sonnenhöhe. Die alten Bildwerke der Ägypter zeichnen sich bekanntlich dadurch aus, daß sie keine Perspektive haben. Aber man kann gerade bei ihnen die allmähliche Erkenntnis der Perspektive verfolgen. Frl. Klebs hat dies Entstehen an den bildlichen Darstellungen sehr überzeugend nachgewiesen (Ztschr. f. ägypt. Sprache 1914, p. 19). Das erste Stadium ist, daß man die vorderen Gegenstände unten, die hinteren oben auf dem Gemälde anbringt; die zweite Periode hat erkannt, daß die hinteren Gegenstände kleiner erscheinen als die vorderen, so wird unter sonstiger Beibehaltung der Anordnung der hinten liegende Gegenstand kleiner gezeichnet; endlich findet sich die reine Profilzeichnung, wozu dann in den letzten Jahrhunderten selbständiger Entwicklung die Verkürzung der nach hinten liegenden Gegenstände kommt, d. h. wenn ein Mensch gezeichnet wird, so ist der dem Beschauer zugewandte Arm größer als der abgewandte, oft in außerordentlich starker Abnahme. Die wirkliche Perspektive findet sich in Ägypten erst auf Bildwerken nach Alexander, ist also von Griechenland dahin gekommen.

Bei den Griechen unterschied man nach Geminos (1. Jahrh. v. Chr.): 1. Optik, die Lehre vom Sehen; 2. Katoptrik, die Lehre von der Reflexion; 3. Skenographie, die Perspektive, und 4. die Dioptrik, Winkelmessung mit Diopter. Über das erste Gebiet besitzen wir nur ein Werk, die Optik des Euklid in zwei Fassungen. Die älteste Druckausgabe in lateinischer Übersetzung von J. Penam (Euclidis Optica et Catoptrica, Parisiis 1557) hat einen Text, der den meisten Handschriften zugrunde lag und aus der Schule Theons von Alexandrien (4. Jahrhundert n. Chr.) stammte, mit einer Einleitung von Theon. Daß dieser sehr verderbte Text so verbreitet war, verdankt das Werk der Aufnahme in den *μικρὸς ἀστρονομούμενος*, einer Sammlung, welche den angehenden Studenten der Astronomie in die Hand gegeben wurde. Es gelang Heiberg, in dem Cod. Vindobon. 31 (12. Jahrhundert n. Chr.) den alten Euklidischen Text, wesentlich besser erhalten, nachzuweisen und so eine gereinigte Ausgabe des Euklidischen Werkes herzustellen (Oper. omn. VII, 1895).

Über Katoptrik werden im Altertum vier Werke genannt: von Euklid, Archimedes, Heron und Ptolemaios. Die Archimedische Katoptrik wird von Theon, Com. i. Ptolemaios Almagest 7, zitiert, ebenso von Olympiodor (Com. i. Aristot. meteorol. II, 94), Apulejus, Apologie 15 u. 16; endlich verweist Georg Valla (De

expet. et fug. rebus XV, 2) 1492 mehrfach darauf; seitdem ist sie spurlos verschwunden. — Eine Katoptrik des Euklid ist Pappos (4. Jahrhundert) noch unbekannt, erst bei Proclos (5. Jahrhundert) ist sie erwähnt. Heiberg hat überzeugend nachgewiesen, daß der uns überlieferte Text unecht ist und von Theon stammt (Literargesch. Studien z. Eukl. 1882, p. 151, und Eukl. op. VII, Prol. 49, 1895). — Die unter dem Namen des Ptolemaios mit dem Titel Ptolemaios de speculis herausgegebene Katoptrik (Venedig 1518) ist die lateinische Übersetzung durch Wilh. von Moerbecke († 1281) nach dem griechischen Original. Martin hat nachgewiesen, daß dieser Text nicht von Ptolemaios stammt, daß dagegen die unter dem Namen von Ammiratus Eugenius Siculus vorhandene Optik in Wirklichkeit von Ptolemaios nach arabischer Vorlage stammt (Bul. Boncompagni IV, p. 466, 1871). Endlich hat W. Schmidt den Nachweis erbracht, daß die Schrift De speculis tatsächlich die Katoptrik Herons ist (Heron op. omn. II, p. 304ff.). — Über Skenographie ist uns kein Buch erhalten, aber wir erfahren durch Vitruv (Archit. VII, Pr. 11), daß Anaxagoras (500—428) über Perspektive geschrieben hat und den perspektivischen Punkt eingeführt hat. — Als Dioptrik ist uns nur die Herons erhalten.

Diese Werke enthalten alle nur geometrische Optik. Die Fragen über das Wesen des Lichtes, den Vorgang des Sehens rechnen die Griechen zur Philosophie und sie finden dort, wegen des spekulativen Charakters der Behandlung, auch ihre richtige Stätte. Dahin gehört das unter Aristoteles' Namen gehende Werk über die Farben, welches wahrscheinlich von Theophrast (300 v. Chr.) geschrieben ist. Aus späterer Zeit beschäftigen sich mit Optik noch Plotin (205—270) in den Enneaden 2, c. 8, und Damianos (etwa 500 n. Chr.) in seinem *κεφάλεια τῶν ὀπτικῶν ὑποθέσεων* wesentlich referierend. In bezug auf diese spekulative Optik verweise ich auf A. Haas (Arch. f. Gesch. d. Philos. 20, 1907).

Die hauptsächlichsten Theorien des Altertums, welche aber bis weit in die Neuzeit Bedeutung gehabt haben, sind von Alexander Aphrodisius (etwa 200 n. Chr.) in seinem Com. in Arist. *περὶ αἰσθήσεως* angegeben: 1. die Sehstrahlentheorie; 2. die stoische Theorie der Spannung der Luft; 3. die epikurische Theorie der Abbilder; 4. Platons Theorie der Synaugie.

Theorie der Sehstrahlen. Nach Pythagoras (Diog. Laert. VIII, 29; Aetius IV, 13) und Autolykos (Apulejus, Apologie 15) sendet das Auge Sehstrahlen aus geradlinig, welche die gesehenen Körper treffen und den dort erlittenen Anprall dem Auge empfindlich

werden lassen, als ob sie den gesehenen Körper betasten. Diese Sehstrahlen sind divergent, lassen also, je weiter vom Auge entfernt, um so größere Zwischenräume zwischen sich, so daß wir kleine Gegenstände, z. B. Nähnadeln, in größerer Entfernung nicht sehen können. Euklid behandelt die Sonnenstrahlen wie Sehstrahlen (l. c., cap. 30). Dem schließt sich im wesentlichen Ptolemaios an (s. Govi, Turin 1885) und Damian (l. c. 13). Diese Theorie hat sich bis über das 17. Jahrhundert hinaus erhalten.

Die stoische Lehre ist in der Hauptsache vertreten durch Chrysippos, Apollodoros und Sphairos (Stoicorum frag. Arnim II, 863—871): Von dem Hegemonikon (seelisches Zentralorgan) gelangt das Sehpneuma in die Pupille und erregt von da aus eine Spannung bis zum gesehenen Gegenstand, welche sich kugelförmig ausbreitet. Damit die Luft diesen Spannungszustand fortleite, ist nötig, daß sie durch die Sonnenstrahlen verdünnt wird. Im Finstern leistet die Luft der Ausbreitung solchen Widerstand, daß die Spannung nur auf ganz kurze Distanz fortgepflanzt wird.

Die epikurische Lehre der Abbilder ist begründet von Empedokles, Leukipp und Demokrit und wesentlich verbreitet durch Lucrez. Die Theorie selbst bei Aetius IV, 13: Von der Oberfläche der Körper lösen sich beständig Atome ab, die als „Abbilder“ des Gegenstandes die Luft nach allen Seiten durcheilen und auch in das Auge eindringen und den Sehnerv erregen. Diese Abbilder sind so weitmaschig, daß sie nur geringen Widerstand in der Luft finden; aber die gröberen Teile dieser Bilder werden doch abgestoßen, je weiter der Weg, um so mehr, so daß die Bilder in weiter Entfernung undeutlicher werden; daraus entstehen die optischen Täuschungen, z. B. daß ein viereckiger Turm in der Entfernung rund erscheint. Eine Empfindung von der Entfernung bekommen wir dadurch, daß die Abbilder kleinere oder größere Mengen Luft vor sich herdrücken. Beim Spiegeln erscheint das Bild hinter dem Spiegel, weil dasselbe an der glatten Fläche zusammengedrückt wird, so daß das Hintere nach vorn kommt. Demokrit nennt diese Abbilder *ὑποτύπωσις*, welche der Körper in der Luft macht. Wäre keine Luft vorhanden, würden wir in jeder Entfernung gleich gut sehen, z. B. eine Ameise, welche am Himmel kriecht (Demokrit, nach Aristoteles, De anima II, 7; Theophrast, De sensu 50—54, Aristoteles, De sensu 2).

Platon (Timaios 45b, Staat 507/08, Menon 76d, Theaetes 156d): Von dem im menschlichen Körper vorhandenen Feuer strömt das feinste aus der Pupille, sobald das Auge geöffnet wird; trifft es nun

in der Luft anderes Licht (Sonnenlicht, oder von der Sonne beschienene Körper, die daher selbst Licht geradlinig ausstrahlen), so kommt Gleiches zu Gleichem, es bildet sich ein Lichtkörper und dadurch die Empfindung des Sehens. Wenn aber das aus dem Auge fließende Licht in die Nacht ausströmt, findet es nichts Gleichartiges, es entsteht also nichts, also auch kein Sehen. Spiegelbilder entstehen dadurch, daß sich die vom Auge und vom Objekt ausgehenden Strahlen auf der glatten Fläche treffen; ist die Fläche rauh, so fallen die beiden Strahlengattungen auf verschiedene Flächen. Die Aussendung des Lichtes von den Körpern erfolgt durch Poren, deren verschiedene Größe die Farben bestimmen (Menon); sind die aus den Poren dringenden Teilchen (Strahlen) von gleicher Größe wie die vom Auge kommenden, so ist der Körper durchsichtig; sind sie größer, so wirken sie zusammenziehend, das erzeugt die Empfindung schwarz; sind sie kleiner, so erfolgt Ausdehnung, das heißt weiß. Aus der Mischung beider entstehen die Farben (Tim. 67).

Aristoteles (De anima II, 7; De sensu 2; Alexander, Comm. 141—147): Das Objekt wirkt auf das Auge durch ein Medium, er nennt es das Durchsichtige. Das ist zunächst nur potentiell durchsichtig, aktuell wird es erst, wenn Feuer oder Äther es hell macht. Das aktuell Durchsichtige wird durch die Farbe des Objekts erregt und dieser Übergang vom potentiellen in den aktuellen Zustand ist eine Veränderung des Durchsichtigen. Daher kann, was keine Farbe hat, nicht gesehen werden. Aus der Abschwächung der Farbe erkennt man die Entfernung. Straton ergänzt diese Philosophie dahin, daß die Farben sich von den Körpern ablösen und die Luft bis zum Auge färben.

Auf die Aristotelische Herleitung der Farben aus Weiß und Schwarz einzugehen, hat kein physikalisches Interesse, wenn sie auch Goethe zu seiner Farbenlehre begeistert hat. Es ist sehr auffallend, daß weder Aristoteles noch sonst ein Grieche auf den Sehvorgang im Auge eingeht, obwohl er die Bestandteile des Auges sehr wohl kennt; das einzige, was aus seiner langen Rede über das Sehen (De sensu 2) richtig ist, beschränkt sich darauf, daß die Medien im Auge durchsichtig sind; denn der Sehnerv, der durch die Strahlen erregt wird, liegt hinter den drei Medien. Sobald aber Aristoteles auf wirkliche Experimente eingeht, z. B. bei der Spiegelung, ist von dieser Theorie nicht mehr die Rede, sondern da hat er die Pythagoreischen Sehstrahlen! Bisweilen liest man, daß Aristoteles schon eine Art „Undulationstheorie des Äthers“ gelehrt habe. Davon steht in seinen Schriften kein Wort! Der

Äther wird hier als ein hellmachendes Agens wie das Feuer behandelt, welches auf das Durchsichtige (διαφανές) wirkt. Schon die wiederholt von Aristoteles aufgestellte Behauptung, daß im luftleeren Raume kein Licht möglich sei, zeigt die Unzulässigkeit jener Behauptung.

Die nachfolgenden Philosophen haben sich entweder einer dieser Theorien mit geringfügigen Abweichungen angeschlossen oder schweigen darüber, oder kommen im 3. und 4. Jahrhundert n. Chr. zur Fernwirkung, wonach das Objekt ohne körperliche Vermittlung auf das Auge wirke, oder die Seele unvermittelt die Objekte berühre. Ein physikalisches Interesse beanspruchen diese Phantasien nicht.

Geometrische Optik.

Der Euklidische Text (Heiberg VII) beginnt mit sieben Definitionen, deren wichtigste sind: Die Sehstrahlen gehen geradlinig unbegrenzt fort, sie bilden einen Kegel; nur die von diesen Strahlen getroffenen Gegenstände werden gesehen, die scheinbare Größe hängt allein vom Sehwinkel ab. Dann folgen 58 Sätze, von denen die wichtigsten lauten: 1. Kein gesehener Gegenstand wird zugleich ganz gesehen (nämlich die Punkte nicht, auf welche keine Sehstrahlen fallen). 2. Von gleichen Objekten erscheint das näherliegende deutlicher. 3. Jedes Objekt kann in eine Entfernung gebracht werden, wo es nicht mehr gesehen wird (s. oben). 8. Gleiche Größen in ungleichen Entfernungen werden nicht proportional den reziproken Entfernungen gesehen (denn $a : a' = \operatorname{tg} a' : \operatorname{tg} a$). 10. Bei einer unterhalb des Auges liegenden Horizontalebene erscheinen die entfernteren Objekte höher, bei einer oberhalb desselben liegenden Ebene tiefer (cf. die Perspektive der Ägypter). In 19 wird die Aufgabe, die Höhe eines Objektes zu messen, wenn die Sonne nicht scheint (also kein Schatten vorhanden ist) mit Hilfe eines horizontalen Spiegels richtig gelöst, usw. Es kommen aber auch falsche Sätze vor, z. B. 25. und 50. Letzterer wird in Theons Text in Nr. 49 richtiggestellt. Da Theons Text erst 370 n. Chr. anzusetzen ist, folgt er erst weiter unten.

Wir sehen, bei Euklid ist das Reflexionsgesetz schon als bekannt vorausgesetzt; es ist wahrscheinlich sehr viel älter, nur fehlen uns die Quellen. Ich finde es zum ersten Male vollständig, aber auch als ein schon bekanntes behandelt bei Aristoteles, Meteor. III, c. 4 u. 5. Er will sogar mit dem Reflexionsgesetz den Regenbogen erklären (ib. III, 2). Die Reflexion an Hohlspiegeln

(bzw. Zylinderspiegeln) ist Platon bekannt (Tim. 46), aber es ist daselbst nicht, wie Rothlauf behauptet, auch vom Brechungsgesetz die Rede. Bis Heron ist in der griechischen Literatur nichts vom Brechungsgesetz zu finden.

Herons Katoptrik (s. oben): Satz 1. Der Sehstrahl geht geradlinig, weil er den kürzesten Weg gehen muß. In einigen Darstellungen verbindet man mit diesem Satz eine mystische Begründung; das liegt Heron völlig fern. Er begründet diese Forderung sehr experimentell. Ein Geschoß geht um so länger in gleicher Richtung, je größer die Geschwindigkeit ist; da nach Satz 2 die Geschwindigkeit des Lichtes unmeßbar groß ist, so muß der Sehstrahl geradlinig sein. Grund für die Behauptung unmeßbarer Geschwindigkeit ist die Tatsache, daß unser Auge sofort beim Öffnen der Augenlider die Fixsterne sehen kann! 3. Warum wird das Licht an blanken Flächen reflektiert? Es kann nicht eindringen, denn Polieren heißt „Verschmieren" der Poren. 4. Die Reflexion findet unter gleichem Sehwinkel statt, wie der einfallende Strahl ihn hat; denn das Licht muß auf dem kürzesten Wege gehen. Daß der Weg dann der kürzeste ist, wenn Inzidenzwinkel = Reflexionswinkel ist, beweist Heron. 5. Reflexion an Konvexspiegeln. 7. und 8. Die reflektierten Strahlen sind bei ebenen und konvexen Spiegeln weder konvergent noch parallel. 9. und 10. Reflexion an Hohlspiegeln. Dann gibt Heron Vorschriften für die Konstruktion von Zylinderspiegeln. Für zylindrische Hohlspiegel gibt er folgende Vorschriften: Ist der Radius des Spiegels r, die Entfernung des Objekts vom Spiegel e, so gibt es für $e = 0$ und $e = r$ keine verzerrten Bilder; im ersten Falle ist das Bild virtuell und rechts und links vertauscht, im zweiten dem Objekt kongruent. Ist $e < \frac{r}{2}$, so ist das Bild virtuell und verbreitert; $e > \frac{r}{2}$ ist das Bild reell, und zwar für $e < r$ verbreitert, für $e > r$ ist es schmäler als das Objekt. Dann konstruiert er Winkelspiegel, Vexierspiegel, Spione usw.

Das Diopter (Opera III, 188), das erste Universalinstrument zum Messen und bis zu dem Quadranten des Landgrafen Wilhelm IV. von Hessen-Kassel 1560 das einzige Instrument, welches mit Stellschrauben arbeitete und für viele Jahrhunderte das vollkommenste (Repsold in Astr. Nachr. 206, p. 94, 1918) als Nivellierinstrument, als Theodolit für terrestrische und astronomische Zwecke brauchbar. Für die letzteren Zwecke ist es mit einer Alhidade in 360°-Teilung versehen. Wegen dieser Teilung ist es sicher nach 133 v. Chr. gebaut, während die Mechanik und Meßkunst Herons sicher vor 133

geschrieben sind, da sie die alte Winkelmessung noch anwenden. Heron zeigt in § 33, welche Vorzüge dies Diopter für astronomische Messungen vor dem sonst üblichen „Stern“ besitzt. Nebenbei sei erwähnt, daß Heron in § 34 das erste Taxameter konstruiert, dann in § 35 die Distanz Rom—Alexandrien durch Mondfinsternisbeobachtung mißt.

Kleomedes (etwa 40 v. Chr.) benutzt zum ersten Male die Strahlenbrechung in der Luft zur Erklärung, daß eine Mondfinsternis eintreten kann, während die untergehende Sonne noch gesehen wird. Er erwähnt dabei zum ersten Male das bekannte Experiment: Man legt einen Ring in ein undurchsichtiges Gefäß und hält das Gefäß so weit vom Auge, daß der Ring wegen des Randes des Gefäßes eben nicht mehr gesehen wird; gießt man dann Wasser in das Gefäß, so erscheint der Ring wieder durch die Brechung im Wasser (De motu circulari corp. coelest. II, 6, p. 222).

Cl. Ptolemaios (87—165), De opticis, 5 Bücher, verschiedentlich zitiert, zuletzt von Ambrosius Rhodius in seiner Optica 1611, dann verschwunden, von Laplace (Exposition du syst. du monde, 2. Aufl., p. 308) in Paris wieder entdeckt, von Delambre (1749—1822) (Mém. Paris VI, 1822) herausgegeben. Bessere Ausgabe von Gilberto Govi, Turin 1885. Es ist eine lateinische Übersetzung des Ammiratus Eugenius Siculus aus dem Arabischen. Das erste Buch ist verloren; es enthielt Beziehungen zwischen dem Sehorgan und dem Licht. Im zweiten heißt es: Das Gesicht (Sehen) gibt Erkenntnis von Größe, Gestalt, Farbe, Bewegung, Ruhe, wenn ein Lucidum vorhanden ist. Die sichtbaren Dinge sind farbig (Aristoteles), die farblosen sind nicht wirklich sehbar. Wann wird ein Ding mit beiden Augen einmal, wann doppelt gesehen? Die Größe der Dinge wird durch Gesichtswinkel und Entfernung bestimmt. 3. Ebene und konvexe Spiegel. 4. Konkave und zusammengesetzte Spiegel, Kegelspiegel, Pyramidenspiegel. 5. Lichtbrechung. Er konstruiert einen Meßapparat; eine in 360^0 geteilte Kreisscheibe hat zwei im Mittelpunkt drehbare Indizes, einen für den Einfallsstrahl, den anderen für den gebrochenen Strahl. Beobachtung in einer mit H_2O gefüllten Halbkugelschale zeigt, daß der gebrochene Strahl dem Einfallslot näher liegt als der in Luft befindliche Einfallsstrahl. Aus den Beobachtungen für von 10 zu 10^0 fortschreitende Inzidenzwinkel bildet er eine Brechungstabelle. Als Mittel ergibt sich für Luft-H_2O das Verhältnis 1 : 0,76344, für Luft-Glas 1 : 0,67380, d. h. ersteres $\sim$ 4 : 3, letzteres $\sim$ 3 : 2. Ebenso mißt er H_2O : Glas, indem er einen Glashalbzylinder über einen Wasser-

halbzylinder stülpt mit dem Ergebnis 1 : 0,9019, ~ 9 : 8. Bei der umgekehrten Richtung findet Ptolemaios den Grenzwinkel. Ptolemaios hat nicht nach einem Gesetz gearbeitet, sondern rein experimentell. Die Vermutung Govis, daß er ein anderes Gesetz, etwa $\varrho = ai - bi^2$ gehabt habe, findet in dem Text keine Stütze. Für die atmosphärische Strahlenbrechung konstruiert Ptolemaios ganz nach Kleomedes (s. oben). Wilde (Geschichte der Optik I, p. 59 u. 73, 1838) behauptet, Ptolemaios habe Proportionalität zwischen Einfalls- und Brechungswinkel gelehrt; an erster Stelle bezeichnet er es freilich nur als wahrscheinlich. Es ist auffallend, daß dieser verkehrte Satz ungeprüft in mehrere spätere Werke übergegangen ist (z. B. Heller). In dem Text Govis (p. 106/07) findet sich nichts dergleichen, Ptolemaios redet da überhaupt nicht von den Winkeln, sondern von scheinbaren Entfernungen!

Praktisch ist die Lichtbrechung natürlich viel früher bekannt gewesen; so läßt Aristophanes in den Wolken (etwa 424 v. Chr.) den Staepsiades sagen (v. 754), er kenne ein sicheres Mittel, sich seiner Gläubiger zu entledigen, nämlich, indem er mit einem Glase (Brennglas) die Buchstaben der Rechnung (Wachstafel) schmelzen wolle. Auch Kleomedes erwähnt das Experiment mit dem Ringe als eine ganz bekannte Sache.

Die Theonische Optik (Eukl. opera VII), etwa 370 n. Chr., geht von einigen allbekannten Erfahrungssätzen aus, welche die Geradlinigkeit der Lichtstrahlen, das Reflexionsgesetz und das Kleomedessche Brechungsexperiment darstellen. Auch in den dann folgenden Sätzen kommt Theon nicht wesentlich über das, was wir aus Ptolemaios usw. schon kennengelernt haben, hinaus. Zu erwähnen ist Satz 7, dessen Sinn ist, daß das Spiegelbild bei einem Planspiegel ebensoweit hinter dem Spiegel liegt, wie das Objekt vor demselben. Satz 12 sagt: Gegenstände, die senkrecht zur Achse eines Hohlspiegels erscheinen, stehen, wenn sie innerhalb des Durchschnittspunktes der Strahlen stehen (d. h. zwischen Spiegel und Brennpunkt) in der Lage, die sie wirklich haben; stehen sie aber außerhalb jenes Punktes, so sind die Bilder umgekehrt. In Satz 17 wird die Lage des Bildes bei Konvexspiegeln falsch angegeben, auch der Satz 23, daß bei konvexen Spiegeln das Bild gerader Objekte stets konvex erscheine, ist in seiner Allgemeinheit nicht richtig. Der Satz 21, daß bei Konvexspiegeln das Bild stets kleiner ist als das Objekt, rührt nach den Schollien, p. 348, von Archimedes her. Satz 30 lautet: Mit Konkavspiegeln gegen die Sonne gehalten, wird Feuer entzündet; dabei stellt er fest, daß der Vereinigungs-

punkt der reflektierten Strahlen entweder zwischen Mittelpunkt und Spiegel oder im Mittelpunkt selbst liege (nämlich, wenn das Objekt selbst im Mittelpunkt liegt). In Satz 49 berichtigt Theon den falschen Satz 50 von Euklid.

Die Sage von den Brennspiegeln des Archimedes taucht zuerst auf bei Galen (De temperamentis III, c. 2, etwa 130 n. Chr.), dann bei Lucian (Oper. VII, p. 295, etwa 160 n. Chr.), bestimmt in dem Fragment des Anthemius (etwa 550 n. Chr.), veröffentlicht durch Dupuy (Hist. d. inscript. 42, p. 400) als mechanisches Paradoxon. Im 2. Teile beschreibt er die Herstellung solcher Brennspiegel aus einer großen Zahl ebener Spiegel von regulär sechseckiger Form, die parallel zur Achse einfallende Strahlen zum Brennpunkt reflektieren. Dann gibt er auch die Konstruktion parabolischer Brennspiegel, wo er meint, Archimedes habe solche wohl benutzt. — Im Jahre 1548 hat Gogava die lateinische Übersetzung eines arabischen Textes herausgegeben als eine Ptolemäische Arbeit, die im 2. Anhang: Antiqui scriptoris libellus de speculo ustorio etc. bringt. Diese Schrift ist dann von Heiberg und E. Wiedemann (Bib. math. [3] 9, Heft 3, 1911) von neuem herausgegeben, da heißt es (Prop. 8), Apollonios habe die symmetrischen Brennpunkte für Ellipsen und Hyperbeln abgeleitet, aber nicht für die Parabel, das tut der Verfasser in Satz 9 und gibt in 10 endlich eine Konstruktion eines parabolischen Brennspiegels an. Gogava hält diese Schrift für eine Arbeit des Ptolemaios oder Archimedes. — Ein weiteres Fragment ist 1881 von H. Belger (im Cod. Ambros., L. 99 aus Bobbio) entdeckt und herausgegeben (Hermes 16, p. 261, 1881) als Fragmentum math. Bobiense). Die Mängel der Ausgabe sind für den 2. Teil von Wachsmuth und Cantor (ib., p. 637) berichtigt, für den 1. Teil von Heiberg (Ztschr. f. Math. u. Phys. 28, p. 121, 1883). In diesem ersten Teile wird der Beweis erbracht, daß die parallel zur Achse eines parabolischen Spiegels einfallenden Strahlen wirklich in einem Punkte vereinigt werden. Darauf wird für sphärische Spiegel die katakaustische Linie abgeleitet. Aus dem Sprachgebrauch und dem Inhalt glaubt Heiberg sich für die Autorschaft des Anthemius entscheiden zu können; jedenfalls kann es nicht älter sein. Es ist danach wohl möglich, daß Archimedes Brennspiegel konstruiert habe; aber es ist sehr unwahrscheinlich, daß sie die Größe und Konstruktion gehabt hätten, um damit die römische Flotte zu verbrennen. Es müßten die Nachrichten weiter zurückreichen, wenn sie beweiskräftig sein sollten.

Von den Arabern hätten wir zunächst Al Farabi (870—953) zu nennen; wenn sein Werk über Perspektive nicht verloren wäre, so können wir nicht entscheiden, ob er den Ruhm, die Sache gefördert zu haben, wirklich verdient. Dagegen hat Alhazen = Ibn Alhaitam (Cantor, Gesch. I, p. 789), der 1038 gestorben ist, ein größeres optisches Werk hinterlassen, welches in lateinischer Übersetzung von Risner als Opticae thesaurus libri VII, 1572 in Basel herausgegeben ist. Da ist im 1. Teil zum ersten Male eine genaue und richtige Beschreibung des Auges: humor aqueus, christallinus, vitreus, tunica adhaerens, cornea, uvea, retina. Er gibt die Lehre von den Sehstrahlen auf; jeder Punkt des Objekts sendet geradlinig nach allen Seiten Lichtstrahlen aus; diese erzeugen in der Linse (!) Bilder. Daß wir mit beiden Augen nur ein Bild sehen, verdanken wir dem X der Sehnerven. Der das Bild erzeugende Strahlenkegel hat den leuchtenden Punkt als Scheitel und die Pupille als Basis. Im 2. Teil zählt er 22 Eigenschaften auf, die gesehen werden können: Helligkeit, Entfernung usw. Im 3. behandelt er die optischen Täuschungen, die durch Phantasie und Verstand verursacht sind. Buch 4 und 6 berichtete die Reflexion von Ebenen, konkaven und konvexen, Kugel-, Kegel-, Zylinderspiegeln auf Grund des Reflexionsgesetzes. Hier wird zum ersten Male ausdrücklich betont, daß Einfallsebene und Reflexionsebene zusammenfallen. Im 5. lehrt er bei gegebener Lage des Objekts und Auges den Reflexionspunkt bei sphärischen, zylindrischen und Kegelspiegeln zu bestimmen. Im 7. kommt er zur Brechung; experimentell wird von 10 zu 10^0 Einfallswinkel der Brechungswinkel bei den Medien Luft, Glas, Wasser untereinander bestimmt und festgestellt, daß Einfallsebene und Brechungsebene zusammenfallen. Er findet freilich nicht das Brechungsgesetz, aber in Satz 10 lehrt er ausdrücklich, daß kein konstantes Verhältnis zwischen Einfalls- und Brechungswinkel bestehe. Er nimmt auch den umgekehrten Weg vom dichteren zum dünneren Medium an. Gegenstände, die im Wasser liegen, erscheinen dem in Luft befindlichen Auge vergrößert (p. 44). Durch ein gläsernes Kugelsegment erscheinen Objekte vergrößert. Die scheinbare Vergrößerung der Sonne und des Mondes im Horizont gegenüber der Stellung im Zenit hatte Ptolemaios auf zwei Weisen erklärt; im Almagest I, 3, hatte er die Erklärung des Poseidonios gegeben (Strabo III, 1), daß die im Horizont vorhandene Dampfmenge größere Brechung hervorrufe als in vertikaler Richtung; in der Optik III, p. 78, aber sagt er, daß wir uns die vertikal gesehenen Gegenstände kleiner vorstellen wegen der ungewohnten Blickrichtung. Auch Alhazen hat zwei

Erklärungen: 1. Wir stellen uns das Himmelsgewölbe ellipsoidisch vor, daher die optische Täuschung. 2. In der horizontalen Richtung denken wir uns wegen der vielen in bekannter Entfernung vorhandenen Objekte die Sonne und den Mond in größerer Entfernung als im Zenit, wo diese Objekte zur Vergleichung nicht vorhanden sind.

Vitello (etwa 1290) hat ein sehr dickes Buch aus Euklid, Ptolemaios und Alhazen zusammengestellt, ohne die Versuchsresultate zu verbessern. Das einzig Neue ist wohl die Erklärung des Regenbogens durch Brechung der Sonnenstrahlen in den Regentropfen. Aber auch hier macht er den Fehler, daß er die Höhe von 42^0 leugnet. Dieser Fehler wird verbessert durch Roger Bacon (1214—1294), der den Gang des Lichtsstrahls richtig darstellt und die Höhe von 42^0 findet; aber wunderbarerweise glaubt er, daß die Farben des Regenbogens eine subjektive Empfindung des Auges seien, veranlaßt durch die verschiedene Feuchtigkeit des Auges. Bacon hat neben sehr vielen anderen über Optik folgende Schriften verfaßt: Die Perspektive (gedruckt 1614 in Frankfurt), De speculis, Specula mathematica, alle in dem gleichen Jahre gedruckt, und besonders sein Opus majus (geschrieben um 1265, gedruckt 1733 in London). Er bestimmt richtig den Brennpunkt bei sphärischen Hohlspiegeln, daß derselbe nur für den Achsenstrahl in der Mitte des Radius liegt, für alle anderen Strahlen ist der Schnitt mit der Achse der Fläche mehr zugewandt. So gibt er richtig die „Längenabweichung“ an $= \frac{r(1-\cos v)}{2\cos v}$, wenn r der Radius und v die Winkelöffnung der Fläche im Zentrum ist, und löst damit die im Fragmentum Bobiense angedeutete Aufgabe (s. oben). So findet er die sphärische Aberration bei Hohlspiegeln. Weil er (p. 357) auf die Vergrößerung der Bilder durch die Brechung in Linsen aufmerksam macht, hat man ihm bei seinen Landsleuten auch die Erfindung der Brillen zugeschrieben. Das ist schon um deswillen nicht möglich, weil er behauptet, daß, wenn man die plankonvexe Linse (Segment) umkehrt, so daß die konvexe Seite dem Objekt zugekehrt sei, die Bilder verkleinert würden. Ebensowenig ist die andere Behauptung richtig, daß Bacon schon ein Fernrohr gekannt habe, bzw. es erfunden hätte. In seinen Werken findet sich nirgends eine derartige Beschreibung oder auch nur eine Andeutung.

Freilich sind um die Lebenszeit Bacons die ersten Brillen bekannt geworden, und zwar werden konvexe Gläser zuerst mit

Sicherheit um 1299 erwähnt in einem Manuskript, welches R. Smith (übersetzt von Kästner) 1755 herausgegeben hat, und diese Brillen sind bikonvexe Gläser gewesen. Darum ist es auch sehr unwahrscheinlich, daß die Grabschrift in Florenz für Salvino degli Armati die Erfindung der Brillen (occhiali) mit Recht in Anspruch nimmt (Volkmann, Nachrichten von Italien I, p. 542). Die richtige Erklärung der Brillen lieferte erst Maurolycus (s. unten). R. Bacon hat aber die Erfindung der Camera obscura gemacht und nicht erst Leonardo da Vinci, wie nach Venturis Erklärung 1797 meist angegeben wird. Duhem hat aus dem Mns. 15171 der Pariser Nationalbibliothek nachgewiesen, daß er in dem verfinsterten Zimmer durch ein enges Loch in der Wand, gleichgültig, ob es rund oder eckig war, das runde Bild der Sonne auf einer Wand beobachtete. Er hat auch gesehen, daß das Bild umgekehrt war, und diese Methode für die Beobachtung der Sonnenfinsternis empfohlen. Aber er ist nicht zur Entdeckung der Irradiation durchgedrungen (Duhem, Système du monde III, p. 505, 1915). Die richtige Erklärung des Nebenregenbogens ist durch den Mönch Theoderich 1311 zuerst gegeben, von Venturi 1814 aufgefunden in: De radialibus impressionibus.

Maurolycus (1494—1577) hat ein größeres optisches Werk hinterlassen: Photismi de lumine et umbra, 1575, worin sehr viel klarer und richtiger die bis dahin gesammelten Kenntnisse dargestellt sind. An neuen Entdeckungen und Beweisen sind folgende zu nennen. Zunächst beweist er, daß bei der Brechung durch planparallele Gläser nur eine parallele Verschiebung der Lichtstrahlen eintritt, deren Größe abhängig ist von der Größe des Einfallswinkels. Dann zeigt er, daß die konvexen Linsen Sammellinsen, die konkaven Zerstreuungslinsen sind, untersucht die Brechung in einer mit Wasser gefüllten Glaskugel und entdeckt dabei die diakaustischen Flächen. Er ist der erste, welcher die sieben Farben des Regenbogens richtig angibt und auch sagt, daß diese Farben durch die Brechung entstehen; ebenso spricht er sich über die Farben bei der Lichtbrechung durch ein Glasprisma aus, obgleich er das Brechungsgesetz nicht kennt. Er zeichnet auch den Gang des Lichtstrahls in dem Regentropfen richtig. Die Frage, warum in der Camera obscura das Bild des Objektes (der Sonne) unabhängig von der Figur des Loches stets kreisrund bzw. bei der Mondsichel stets als Sichel erscheint, beantwortet Maurolycus richtig: In der Nähe des Loches erscheint auf dem Schirm eine dem Loche ähnliche Figur, in weiterer Entfernung aber das Bild des Objekts, denn dann

überdecken sich die Bilder der von jedem Punkte ausgehenden Lichtstrahlen. Kepler hat diese Vorstellung durch eine Konstruktion mit Zwirnsfäden sehr anschaulich gemacht (Paralipomena ad Vitellionem, 1604). Ganz besonders verdienstlich ist Maurolycus' Darstellung des Sehvorganges im Auge; er erkennt die überragende Bedeutung der Glaslinse im Auge, die dort gerade so wirke wie jede künstlich hergestellte Glaslinse. Infolgedessen entsteht das Bild des gesehenen Objektes nicht, wie früher angegeben war (s. oben) auf der Linse, sondern die von dem Objekt ausgehenden Strahlen scheiden sich hinter der Linse. Ist die Krümmung der Linse zu gering, so kommt der Schnittpunkt zu weit zurück, das ist die Krankheit der Weitsichtigen, sie müssen konvexe Brillen tragen; ist die Krümmung der Linse zu groß, so entsteht Kurzsichtigkeit, der durch konkave Brillengläser abgeholfen wird. Aber über die Bedeutung der Retina und der Bilderzeugung auf derselben ist Maurolycus noch nicht unterrichtet.

Weniger sorgfältig scheint der Zeitgenosse des Maurolycus, Giambatista della Porta, gearbeitet zu haben (1538—1615). Schon mit 15 Jahren gab er 1553 zum ersten Male seine Magia naturalis heraus, die viele Auflagen und viele sehr notwendige Verbesserungen erlebte. Gewöhnlich wird nach der Ausgabe von 1589 zitiert. Im 17. Buche kommt Porta zur Optik. Er behandelt zunächst die Winkelspiegel und gibt die Anzahl der Bilder, wenn γ der Winkel der beiden Spiegel ist, an zu $360/\gamma - 1$. Das ist richtig, wenn das Objekt in der Winkelhalbierenden liegt; macht es aber mit den Spiegeln die Winkel φ und φ', so muß man einzeln rechnen, nämlich $\frac{180-\varphi}{\gamma}$ und $\frac{180-\varphi'}{\gamma}$ und bei gebrochenen Quotienten die nächsthöhere Zahl nehmen. Bei Hohlspiegeln bestimmt er den Brennpunkt, nennt ihn Punctum inversionis imaginum, weil dort die Umwandlung von vergrößerten aufrechten Bildern (zwischen Brennpunkt und Fläche) und umgekehrten Bildern stattfinde. Dieser Gedanke führt ihn dann zu dem Vorschlag, den Brennpunkt außerhalb der Fläche zu verlegen, was bei parabolischen Spiegeln möglich ist durch Abschneiden der Scheitelregion. Der Vorschlag ist natürlich nie ausgeführt. Glücklicher ist Porta bei der Camera obscura, wo er in der Öffnung eine bikonvexe Linse anbringt. Dabei findet er eine Art Vorläufer des Sonnenmikroskops, indem er transparentes Papier mit Zeichnungen, durch die Sonnenstrahlen beschienen, als Objekt verwertet. Beim Auge hat er freilich die Erzeugung des Bildes auf der Glaslinse behauptet, aber er entdeckt

die Veränderung der Weite der Pupille mit der Intensität des Lichtes. Von Interesse ist endlich die Bemerkung Portas, daß das Blinkern der Sterne durch die Bewegung der Dünste in der Atmosphäre veranlaßt sei.

Neuzeit.

Mit dem Eintritt in die neue Epoche werden wir nun wieder einzelne Probleme behandeln.

Das Brechungsgesetz.

Durch die mitgeteilten Versuche war festgestellt, daß zwischen Einfalls- und Brechungswinkel kein konstantes Verhältnis bestehe. Joh. Kepler (1571—1630) bemüht sich in Ad Vitellionem Paralipomena, 1604, ein Gesetz zu finden. Für Einfallswinkel bis zu 30° glaubt Kepler für Luft-Glas das Verhältnis der Winkel = 3 : 2 festlegen zu können; darüber hinaus wird das Verhältnis immer ungenauer, so daß er bei 90° Inzidenz den Brechungswinkel = etwa 48° messen kann. Auch die atmosphärische Strahlenbrechung macht ihm große Schwierigkeiten. Darum versucht er, das Verhältnis durch den Sekanz auszudrücken $= \alpha + \sec \alpha$. In der Dioptrice, 1611, gibt er eine einfache Vorrichtung an, um die Brechung zu messen; er legt an eine undurchsichtige Wand einen Glaswürfel mit gleicher Seitenlänge, dann gibt die Wand vor dem Würfel einen Schatten in Luft, und im Glaswürfel erzeugt die Wand einen kürzeren Schatten. Das Verhältnis ist ein Maß der Brechung, aber es liefert ihm kein feststehendes Verhältnis. Jedoch das Experiment veranlaßt ihn, die Camera lucida zu erfinden.

Erst René Descartes (1596—1650) kommt trotz einer falschen Vorstellung zum richtigen Resultat. Freilich erklärt Huygens (Dioptrica, 1698 posth., p. 2), daß Descartes die Ableitung des Brechungsgesetzes von Willebrord Snellius (1591—1626) gekannt habe. Diese Ableitung ist aber erst durch Isaak Vossius (1618 bis 1689; De lucis natura et proprietate, 1662, p. 36, cf. Responsio ad objecta de Bruyn, p. 32) veröffentlicht. Sie ist rein experimentell, indem Snellius nachweist, daß das Verhältnis der in den beiden Medien in gleicher Zeit zurückgelegten Wege konstant ist; diese zurückgelegten Wege aber verhalten sich wie die Cosec der Einfalls- und Brechungswinkel. Ich kann nicht nachprüfen, ob die Behauptung Huygens' aufrecht zu erhalten ist. Jedenfalls geht Descartes von einem Analogieschluß und ganz anderen Vorstellungen aus.

Er vergleicht den Lichtstrahl mit einem geschleuderten Balle, welcher bei einem Anprall an eine weiche Bande mehr von seiner Geschwindigkeit verliert als beim Anprall gegen eine feste Bande. Daraus schließt er, daß der Lichtstrahl in dichtem Medium größere Geschwindigkeit habe als in dünnem! Nun zerlegt er die Bewegung in die beiden Komponenten senkrecht zur Grenze und parallel zur Grenze; die letztere Komponente behandelt er als konstant, dann ergibt sich, daß das Verhältnis der Abszissen konstant ist (Discours de la methode etc., la dioptrique, 1637, p. 20, spec. 23). Im 3., 4. und 5. Kapitel der Dioptrik wendet er das Gesetz auf das Auge an, behandelt aber nur die Brechung durch die Linse.

Gegen die Descartessche Ableitung des Brechungsgesetzes wendet sich mit großer Schärfe Fermat (1608—1665), dessen Arbeiten erst nach seinem Tode 1679 durch seinen Sohn herausgegeben wurden (Varia opera math., p. 156). Zunächst hatte Fermat das Gesetz selbst für falsch gehalten, als aber durch die Beobachtungen das Gesetz als richtig erwiesen war, bekämpfte er nur die Ableitung, daß das Licht in dem dichteren Medium weniger Widerstand finden müsse als im dünneren. Für diese auffallende Annahme hatte übrigens Descartes auch den Grund angeführt, daß das Licht sich im leeren Raume mit unendlicher Geschwindigkeit bewege; denn wenn es das nicht täte, so müßte eine scheinbare Bewegung der Fixsterne (die Aberration) zu beobachten sein; da das nicht vorhanden sei, so müsse das Licht eben instantan sich ausbreiten. Daß diese Aberration aber tatsächlich ist, bewies Bradley bekanntlich 1727 (Phil. Trans. 1728). Fermat leitet dann das Brechungsgesetz aus dem etwas geänderten Heronschen Prinzip des kleinsten Kraftaufwandes her, indem er nicht wie jener den Weg, sondern die Zeit als ein Minimum fordert; so ergibt sich das Brechungsgesetz in der üblichen Form. Auch Leibniz geht bei der Bekämpfung der Descartesschen Ableitung von dem Prinzip des kleinsten Aufwandes aus (Act. erud. 1682, p. 185), aber als Aufwand bestimmt er eine Arbeitsleistung, nämlich den Widerstand multipliziert mit dem Wege. Ist also m der Widerstand im ersten Medium, l der Weg in demselben, p der Widerstand im zweiten, s der Weg ebenda für gleiche Zeiten, so soll $m \cdot l + p \cdot s$ ein Minimum sein, also $m\,d\,l + p\,d\,s = 0$, er drückt dann die Wegelemente durch die Winkelfunktionen aus und findet $\frac{m}{p} = \frac{\sin \beta}{\sin i}$; es ist also der Widerstand im dichteren Medium größer.

Bei Huygens ist das Minimum des Zeitaufwandes nicht wie bei Fermat ein Axiom, sondern er beweist, ausgehend von seinem Prinzip (s. unten), daß für das Brechungsgesetz aus seinem Prinzip sich ergibt, daß jeder von dem durch das Brechungsgesetz vorgeschriebenen Wege abweichende Weg für die Fortpflanzung des Lichtes längere Zeit erfordert (Tract. de lumine, 1690). Newtons Ableitung geht von der gleichen Voraussetzung aus wie Descartes, daß das Licht sich im dichteren Medium mit größerer Geschwindigkeit bewege als im dünneren (Optics or a treatise of the refl. etc. of light, 1704). Die Gültigkeit des Brechungsgesetzes ist seitdem nicht mehr bezweifelt, aber die physikalische Begründung und die Anwendung hängt mit der Auffassung über das Wesen des Lichtes so eng zusammen, daß davon erst später gehandelt werden kann. Die Anwendung des Brechungsgesetzes auf Linsen ist wohl zuerst von Cavalieri (1598—1647) ausgeführt (Exercitationes geom., 1647). Er leitet experimentell Brennweite und Bildweite ab für bikonvexe und konvex-konkave Linsen. Newtons Lehrer Barrow rechnet sehr mühsam für einzelne Linsen die Bildweiten aus (Lectiones optici, 1674). Von allgemeineren Gesichtspunkten geht Edmund Halley (1656—1742) aus und findet die bekannte Halleysche Gleichung (Phil. Trans., Nov. 1693)

Erfindung des Fernrohrs und Mikroskops.

Vorläufer für die Erfindung dieser Instrumente ist Fracastorius († 1553) in seiner Homocentrica. Er sagt, daß, wenn man durch zwei zusammengesetzte Linsen sieht, wird man alles vergrößert und genähert sehen: Per duo speciola ocularia si quis perspiciat, altero alteri superposito, majora multo et propinquiora videbit omnia. Und N. Cabaeus (1585—1650) erzählt von einem Jesuiten, der sich einer konkaven und einer konvexen Linse bediente. Das kann also auch ein Fernrohr oder wahrscheinlicher ein Mikroskop gewesen sein. Endlich behauptet Cysatus in seinem Werke über die Kometen (1618), daß im Kloster Scheyern ein vor 400 Jahren geschriebenes Manuskript liege, worin von jemand erzählt würde, daß er durch den Tubus opticus die Himmelskörper beobachte. Einige behaupten nun, in dem Tubus opticus seien Linsen gewesen; doch scheint mir das sehr unwahrscheinlich. Schon im Altertum ist bekannt gewesen, daß man durch eine enge, lange Röhre ohne irgendwelche Linsen ungestört und schärfer beobachten könne als bei offenem Sehen. Auch Porta spricht in seinen

Paralipomena, p. 202, von Linsenkombinationen konvex-konkav, aber nirgend ist eine Andeutung zu finden, daß ein Instrument damit gemeint sei. Ob es sich um eine feste Zusammenstellung der Linsen handelt, ist auch bei Fracastorius (Homocentricorum seu de stellis lib., 1538) und bei L. Diggs (Pantometrie, 1571) zweifelhaft.

Daß um 1608 in Holland das erste Fernrohr hergestellt sei, kann nicht bezweifelt werden, da alle ersten Erwähnungen dieses Apparats (Galilei, Descartes usw.) ausdrücklich auf Holland hinweisen. Die amtlichen Urkunden der Generalstaaten ergeben das gleiche Urteil, lassen jedoch nicht mit Sicherheit den ersten Erfinder feststellen. Um Klarheit zu schaffen, wurde in einer Gerichtsverhandlung 1654 in Middelburg durch Zeugenvernehmung und Urkunden festgestellt, daß der Brillenmacher Zacharias Jansen mit seinem Vater zusammen nach 1590 und vor 1609 in Middelburg Fernrohre aus einer Konvexlinse als Objektiv und einer konkaven Linse als Okular in einer Länge von 15—16 Zoll konstruiert habe. Von ihm soll dann der Glasschleifer Lipperseim (Lippersheim) 1609 die Kunst gelernt und Fernrohre zuerst in den Handel gebracht haben. Jansen hat dann 1618 längere Fernrohre hergestellt (cf. Hieronymus Sirturus, De origine telesc., 1618, p. 24, die erste Beschreibung dieser Fernrohre). Im Jahre 1655 gab dann Borelius seine Schrift De vero telescopii inventore, heraus, worin er, ein Spielgefährte des Jansen, berichtet, daß die beiden Jansen zuerst ein Mikroskop gebaut hätten, und ein solches sei Moritz von Nassau, ein anderes Erzherzog Albert geschenkt. Jedoch stimmt die Beschreibung des Apparates bei Hieronymus Sirturus nicht zu einem Mikroskop, sondern zum Teleskop. Die Kombination der beiden Linsen, eine konvexe und eine konkave, war jedenfalls das Charakteristische für dies erste Teleskop. Im Jahre 1610 hat dann Galilei im Sidereus nuntius seine Nachkonstruktion der holländischen Fernrohre mit der gleichen Kombination ausführlich beschrieben und dasselbe so gut ausgeführt, daß er damit eine Reihe äußerst wichtiger Himmelsentdeckungen machen konnte, die er dort aufzählt: Mondgebirge, vier Jupitermonde, Saturn als einen dreifachen — der Ring wurde erst von Huygens 1659 (Systema Saturnium) entdeckt und auch der erste Saturnmond —, die Sonnenflecke und die Phasen der Venus.

Die geringe Vergrößerung und die Kleinheit des Gesichtsfeldes bei diesen Fernrohren veranlaßten Kepler, die Konstruktion von

Fernrohren mit zwei und drei bikonvexen Linsen auszurechnen (Dioptrice, 1611, Prop. 86 u. 89). Diese Vorschrift wurde von Christoph Scheiner 1613 ausgeführt und zur Beobachtung der Sonnenflecke benutzt (Rosa Ursina, 1626—1630). Dann stellte Schyrl de Rheita ein binokulares Teleskop 1645 her (Oculus Enoch et Eliae) und baute ein Fernrohr mit vier konvexen Linsen. Er fügt seinem Werke Tabellen ein über die günstigsten Verhältnisse von Okular und Objektiv.

Die Verbesserung der Fernrohre ist wesentlich gefördert durch Chr. Huygens, der 1655 mit seinem Bruder Constantin eine große Menge von Teleskopen berechnete und besonders die Objektive behandelte. Er legte besonderen Wert auf die Apertur und die Beseitigung der farbigen Abweichung. Um letztere möglichst zu beseitigen, berechnete er ein Fernrohr von 123 Fuß Länge! Er führte Diaphragmen ein und kombinierte zwei Linsen (Dioptrika). Die sphärische Abweichung hat Newton wohl zuerst zu beseitigen gelehrt (Optice, I, p. 68). Er behauptet dann, daß die farbige Abweichung überhaupt nicht beseitigt werden könne, ohne die ganze Brechung zu beseitigen. Diese Fragen beschäftigten Euler viele Jahre. Die Farbenzerstreuung zu beseitigen bei zwei Linsen ist das Problem, welches Euler zuerst behandelt (Mém. Berl. 3, p. 274, 1747). Daraus entsteht eine Diskussion mit dem Londoner Optiker Dollond (Phil. Trans. 1753, I, p. 292, und Mém. Berl. 9, p. 294, 1753) über das Newtonsche Dispersionsgesetz, welches Euler widerlegt. Er stellt eine neue Dispersionsformel auf (Oper. var. II, 1750, p. 1), welche von Rudberg (Pogg. Ann. 9, p. 483, 1827) nahezu auf gleiche Weise wieder gefunden ist. Beide sind von Cauchy als unhaltbar nachgewiesen 1836 (Mém. sur la dispersion de la lumière, Prag.). Cauchys Formel wurde von Christoffel verbessert (Pogg. Ann. 117, p. 27, 1862) und von Briot (Essais. 1863). Ausführlich ist auch die Briotsche Reihe geprüft und berichtigt durch Ketteler (Pogg. Ann. 140, p. 1, 1870) und O. E. Meyer (Pogg. Ann. 145, p. 80, 1872), der auch die von Christiansen entdeckte anomale Dispersion (Pogg. Ann. 141, p. 479, 1870) behandelt, für welche Helmholtz eine umfassende Theorie aufstellte (Pogg. Ann. 154, p. 582, 1875). Lommel bringt eine Dispersionsformel mit nur zwei Konstanten (Wied. Ann. 8, p. 828, 1879). Für eine große Reihe brechender Medien gibt Rubens die Dispersion an mit ultraroten Strahlen (Wied. Ann. 45, p. 238, 1892). Endlich behandeln Kayser und Runge die Dispersion der Luft (Wied. Ann. 50, p. 293, 1893).

Euler hat aber nicht nur Fernrohrkombinationen berechnet (Dioptrica, 3 Bde., Petersburg 1769—1771), sondern auch wirklich ausführen lassen; er wendet zuerst ein achromatisches Objektiv an (Mém. Berl. 18, p. 117, 226, 249, 1762) und ein sogenanntes Campanisches Okular (Opera posth. 2, p. 739). Diese Arbeit ist zwischen 1757 und 1761 geschrieben. Seine Fernrohre enthielten bis zu acht Linsen und waren dementsprechend kurz und handlich. Den Abschluß dieser Untersuchungen gab C. F. Gauss (1777 bis 1855) in seinen Dioptrischen Untersuchungen (1838—1841), als er die Hauptebenen und Hauptpunkte einführte, wodurch die Behandlung zusammengesetzter Instrumente wesentlich erleichtert wurde. Die Bestimmung der Brennweite mit diesen Hauptpunkten ist wohl zuerst von Meyerstein (Pogg. Ann. 64, p. 321, 1845) angewandt. Die Methode, die Hauptpunkte eines beliebigen Systems zu finden, ist von mir ausgearbeitet (Pogg. Ann. 160, p. 169, 1877). Listing führte neben den Hauptpunkten die Knotenpunkte ein (Gött. Nachr. 1845). Das Problem der dioptrischen Apparate war durch Gauss' Untersuchungen als das Problem der genauen Abbildung einer Fläche auf eine andere dargestellt. Für die weitere Behandlung erwies sich besonders wertvoll die Einführung der „charakteristischen Funktion“ durch W. Hamilton (1805—1865; Rep. Brit. Assoc. 1833). Moebius (1790 bis 1868) zeigte dann, daß die Aufgabe durch Collineations Verwandtschaft zu lösen sei (Ber. d. k. sächs. Ges. d. Wiss. 1855). Ebenso behandelte Maxwell die Aufgabe als eine rein geometrische in der Arbeit über die Gesetze optischer Instrumente (Quart. Journ. math. 1858). Während sich Lippich (Mitt. d. Naturw. Vereins Graz 2, 1870/71) in der Richtung der Möbiusschen Arbeit mit den Fundamentalpunkten dioptrischer Systeme beschäftigt, ist die Theorie der optischen Abbildung wesentlich gefördert durch W. Thiesen (Sitz.-Ber. d. Berl. Akad. 1890, p. 799, und Wied. Ann. 45, p. 821, 1892), der den Begriff des „vollkommenen“ Diopters einführt. Den größten Fortschritt auf diesem Gebiete erreichte jedoch erst Abbe (1840—1905) in einer langen Reihe von Veröffentlichungen, von 1869 beginnend und stets darauf bedacht, die Ergebnisse theoretischer Untersuchung praktisch durchzuführen. Die Abbeschen Arbeiten sind meist in den Sitz.-Ber. d. Ges. f. Med. u. Nat. Jena, von 1871 an, und in Carls Repert. erschienen. Die Bedeutung der Blenden (1870), der Aplanatismus (1879), die Achromasie, die Lichtstärke sind darin behandelt. Die Theorie des Mikroskops ist in den Bänden 5, 6, 8, 11, 12 von 1888—1895

der Ztschr. f. wiss. Mikroskopie ausführlich behandelt. Eine zusammenfassende Darstellung der Abbeschen Theorie optischer Instrumente gibt sein Mitarbeiter Czapski in „Theorie der optischen Instrumente“, 1893. Abbe kommt zu dem Schlusse, daß ein vollkommenes Diopter, wobei also die obengenannten Fehler völlig vermieden werden, überhaupt nicht möglich sei (Carls Repert. 16, p. 306).

Spiegelteleskope.

Die Mangelhaftigkeit der ersten Fernrohre, besonders die Schwierigkeit der Achromasie, vielleicht auch der Einfluß des griechischen Brennspiegels, zeitigten die Versuche, Spiegelteleskope zu konstruieren. Der erste Versuch ist wohl von Nicolaus Succhius (1586—1670) gemacht, der dafür das Jahr 1616 angibt, gedruckt 1652 in Optica philosophia, p. 126. Die von dem großen metallischen sphärischen Hohlspiegel *A* reflektierten Strahlen werden von einem kleinen konaxial aufgestellten gläsernen Hohlspiegel *B* zurückgeworfen und gehen durch eine im Zentrum von *A* angebrachte Linse zum Beobachter. Eine Abänderung dieser Einrichtung gibt Mersenne an (Phänom. hydraul. pneum., 1644). Für *A* nimmt Mersenne einen großen parabolischen Spiegel, für *B* ebenfalls einen parabolischen, der nun die Strahlen durch eine zentrale Öffnung des *A* direkt ohne Linse ins Auge zurückwirft. Doch ist dieser Vorschlag Mersennes, soviel ich weiß, nie ausgeführt. Das gleiche Prinzip legte Jacob Gregory (1638—1675) seiner Konstruktion (Optica promota, p. 92, 1663) zugrunde. *A* war ein parabolischer, *B* ein elliptischer Spiegel, dessen einer Brennpunkt mit dem Brennpunkte des parabolischen Spiegels zusammenfiel, dessen anderer Brennpunkt in die Achse hinter der in der Mitte durchbrochenen Fläche von *A* lag in einem kleinen Rohre, welches ein plankonvexes Okular trug. Diese Gregorysche Idee ist dann von Hooke mit sphärischen Spiegeln wirklich ausgeführt (Phil. Trans. 1674).

Die Durchbrechung der spiegelnden Fläche im Mittelpunkte und die dadurch bewirkte Vernichtung der wirksamsten Strahlen veranlaßte Newton (Phil. Trans. 1668), statt des kleinen Hohlspiegels eine kleine, unter 45^0 gegen die Achse geneigte, planparallele Glasplatte in der Nähe des Brennpunktes aufzustellen und die so reflektierten Strahlen einem seitlichen Rohre zuzuführen, wo sie durch eine bikonvexe Linse zum Beobachter gelangten. Da der Beobachter hier senkrecht zur Achse des Rohres und zur Achse des Hohlspiegels beobachten muß, wurde auf dem Rohre parallel

zur Achse ein kleineres Fernrohr als „Sucher“ aufgebaut. Diese recht unhandlichen Teleskope wurden dann wesentlich durch die nach Eulers Dioptrik verbesserten dioptrischen Fernrohre verdrängt, bis W. Herschel (1738—1822, Phil. Trans. 1795, p. 347) sein großes Spiegelteleskop mit 40 Fuß Brennweite konstruierte, wo die Achse des Spiegels einen kleinen Winkel mit der Achse des Rohres macht, so daß das Bild in die Seitenwand des Rohres fällt und hier durch eine Linse beobachtet wird. Diesem Prinzip folgen auch die späteren Spiegelteleskope bis in die Neuzeit.

Doppelbrechung.

Im Jahre 1669 veröffentlichte Erasmus Bartolinus (1635 bis 1698) seine Beobachtungen am Isländischen Doppelspat (Exper. cryst. Islandici, quibus mira et insolita refractio delegitur). Er hat für den ordentlichen Strahl das Brechungsverhältnis 5 : 3 bestimmt, hat die Richtung, wo nur ein Bild erscheint, nahezu richtig gemessen, hat die verschiedene Distanz der beiden Bilder in Abhängigkeit von der Neigung beobachtet. Er sucht die Ursache für den außerordentlichen Strahl in der Lage der Poren des Kristalls.

Im K. 5 des Tractatus de lumine (1690) beschäftigt sich Huygens mit dieser Erscheinung. Er mißt die Winkel des Rhomboeders der Spaltflächen genauer als Bartolinus zu 101° 52′ und den Neigungswinkel der Kante zu 109° 3′. Er legt den Hauptschnitt fest und nennt die kürzere Diagonale desselben die Achse des Kristalls. Für den ungebrochen durchgehenden Strahl mißt er 73° 20′ gegen die Begrenzungsfläche. Zur Erklärung nimmt Huygens an, daß die Moleküle des Kristalls flache Rotationsellipsoide seien, deren Hauptachse der Hauptachse des Kristalls parallel gerichtet sei. Mit Hilfe seiner Schwingungstheorie kann er dann alle Beobachtungen erklären mit Ausnahme folgender: 1. Legt man zwei Kristalle so aufeinander, daß die Hauptschnitte in einer Ebene liegen, so gehen beide Strahlen unverändert durch beide Kristalle, der ordentliche erfährt nur ordentliche, der außerordentliche nur außerordentliche Brechung. 2. Stehen dagegen die Hauptschnitte beider Kristalle senkrecht zueinander, so erleidet der ordentliche Strahl des oberen im unteren außerordentliche Brechung und der außerordentliche des oberen im unteren die ordentliche Brechung. 3. In allen übrigen Lagen erleiden beide Strahlen des oberen Kristalls im unteren Doppelbrechung. Da Huygens longitudinale Schwingung

des Lichts annahm, mußte seine Theorie hierbei versagen (s. unten). Huygens fand ferner, daß auch Bergkristall die gleichen Erscheinungen zeigt, wenn auch in geringerem Grade als der Doppelspat.

Daß außer den von Huygens genannten Kristallen noch viele andere die Doppelbrechung zeigen, hat Du Fay im Jahre seines Todes 1739 zuerst nachgewiesen; als alleinige Ausnahme findet er Kristalle des tesseralen Systems (Hist. Acad. Paris, Nachruf v. Fontenelle, 1739, p. 81). Das ist durch alle späteren Versuche nur bestätigt. Besonders durch die Untersuchungen von Marx (Schweigg. Journ. 47, p. 236; 49, p. 160, 1826/27) sind Kristalle gefunden, bei denen die Doppelbrechung stärker ist als beim Doppelspat, z. B. das salpetersaure Natron (ib. 57, 1829). Bei den meisten Kristallen ergab sich, daß der Brechungsquotient für den ordentlichen Strahl größer als für den außerordentlichen war. Aber Biot fand mehrere, wo das Verhältnis umgekehrt ist (Mém. Paris 1814). Daß die in den Kristallen gebrochenen Strahlen auch Färbung annehmen, ist wohl zuerst von Beccaria (Phil. Trans. 52, p. 489, 1762) beobachtet; sehr ausführlich handelt über diese Färbung Brewster (Phil. Trans. 1815, p. 270). Er ist es, der auch zuerst auf den Unterschied zwischen einachsigen und zweiachsigen Kristallen aufmerksam macht. Er unterscheidet bei den einachsigen positive und negative, oder nach der von ihm angenommenen Newtonschen Theorie Kristalle mit anziehender doppelter Brechung und abstoßender doppelter Brechung. Brewster hat dann für zweiachsige Kristalle bei einer großen Zahl die Neigungswinkel der beiden Achsen zueinander bestimmt (cf. Gilb. Ann. 9, p. 156, 1811). Brewster fand endlich auch, daß durch Druck in Körpern, die im gewöhnlichen Zustande keine Doppelbrechung zeigen, z. B. Glas, Kochsalz und Topas, die Polarisation der durchgegangenen Lichtstrahlen erzeugt wird (Phil. Trans. 1816, p. 167). Jedoch schon vor ihm hat Rochon folgendes Experiment gemacht; er legt einige schmale Scheiben von Glas verschiedener Brechbarkeit aufeinander, schmilzt sie dann zusammen und hat daran die Doppelbrechung beobachtet (Recueil d. mém. etc. 1783). Dagegen enthält die bisweilen zitierte Arbeit von Brisson (Pésant. spec. d. corps 1787) nichts Neues gegenüber den Resultaten Du Fays. Von Mitscherlich wurde bei zweiachsigen Kristallen zuerst der Einfluß der Temperatur auf den Winkel der beiden Achsen entdeckt (Pogg. Ann. 8, p. 520, 1826) und von Marx (Schweigg. Journ. 49, p. 184, 1827) auch auf andere Kristalle als Gips ausgedehnt.

Die Untersuchung der Kristalle auf Polarisation weckte auch das Bedürfnis, die Form der Kristalle und besonders die Neigungswinkel der Kristallflächen zu bestimmen. Dazu diente das Goniometer. Haüy (1743—1822) hat seine ausgedehnten Messungen mit einem mechanischen Goniometer von Carangeot ausgeführt (Journ. Min. V, 1797). Wollaston (1766—1828) ersetzte dies durch sein Reflexionsgoniometer, welches jedoch nicht vollkommen durchkonstruiert war (Phil. Trans. 1809, p. 253) und erst durch Mitscherlich 1827 die Form erhielt, daß genaue Messungen damit möglich wurden (Abhandl. Berlin 1843, p. 189).

Die Unvollkommenheit des Wollastonschen Apparats machte es möglich, daß sich noch 1824 die primitive Konstruktion Adelmanns (Pogg. Ann. 2, p. 83, 1824), wo der bewegliche Radius einer Kreisteilung an die Flächen des Kristalls direkt angelegt wurde, Eingang verschaffen konnte. Bei dem Rudbergschen Goniometer (ib. 9, p. 517, 1827) wurde das Beobachtungsfernrohr auf der Kreisteilung gedreht bei feststehendem Kristall, von dessen Flächen die von einer Marke ausgesandten Strahlen reflektiert werden.

Ein wesentlicher Fortschritt wurde durch Malus (1773—1812) erreicht, indem er nachwies, daß die beiden Strahlen polarisiert seien, aber von gleicher Lichtstärke (Théorie de la double réfraction, 1810). Mit dem Namen Polarisation nahm Malus eine Bezeichnung wieder auf, die Newton angedeutet hatte (Optice. III, quaestio 29), wo er fragt, ob man nicht zur Erklärung der Doppelbrechung annehmen müsse, daß die Lichtteilchen zweiseitig oder gar vierseitig verschieden gestaltet seien. Malus wie auch Laplace, Poisson und Biot waren Anhänger der Emissionstheorie und sahen in dieser Entdeckung einen Beweis für die Richtigkeit der Newtonschen Hypothese.

Young, der seinerzeit bedeutendste Vertreter der Undulationstheorie, stand zuerst auch auf der Annahme Eulers, daß das Licht in longitudinalen Wellen des Äthers bestehe, und war daher nicht imstande, die Polarisation zu erklären. Da schrieb Young am 12. Januar 1817 an Arago einen Brief, worin er sagte, daß man bei Annahme transversaler Schwingungen imstande sei, die Polarisation der beiden Strahlen zu erklären. Das ist der Ausgangspunkt für die Fresnelschen Untersuchungen (s. unten), wodurch die Ableitung der Doppelbrechung aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung unter Zugrundelegung der Emissionstheorie von Laplace (Mém. d. l'Inst. 10, p. 300, 1803) überholt wurde.

Beugung und Interferenz.

Im Jahre 1650 gab Grimaldi (1613—1663) das Rätsel auf: Licht plus Licht gibt Dunkelheit. Aber erst zwei Jahre nach seinem Tode wurde das von ihm ausgearbeitete Werk: Physico-mathesis de lumine etc., von seinen Ordensbrüdern gedruckt herausgegeben. Darin beschreibt er sehr ausführlich die Versuche über die Schattenstreifen eines dunklen Objekts, welches in den Lichtkegel der durch eine kleine Öffnung in ein dunkles Zimmer eintretenden Lichtstrahlen gebracht ist. Die um das Bild des runden Loches, durch welches in einem zweiten Versuch das Sonnenlicht in das Zimmer trat, sichtbaren dunklen und hellen Ringe veranlaßten Grimaldi, die Erscheinung nach Art der um einen eingeworfenen Stein sich bildenden Wasserwellen aufzufassen. Schon in der Vorrede hatte er erklärt, Licht sei ein Accidens subjectabile in corporibus diaphanis. Er beobachtet auch die farbigen Ränder dieser Streifen und schließt daraus, daß die farbigen Strahlen Bestandteile des weißen Lichtes seien. Er nennt die Erscheinung Diffraktion; Newton nennt sie in seiner Optik Inflektion = Beugung. Ähnliche Versuche stellte, wie er behauptet unabhängig, Hooke (Phil. Trans. 1672) an, ohne zu neuen Resultaten zu kommen. Aber in einer Beziehung war Hooke in der Tat ein Vorläufer moderner Auffassung. Während Huygens ausdrücklich longitudinale Schwingungen voraussetzte und Grimaldi diese Frage nicht beantwortete, hielt Hooke das Licht für transversale Schwingungen des Mediums: The motion of light in an uniform medium, in which it is generated, is propagated by simple and uniform pulses or wawes, which ar at right angles with the line of direction (cf. Birch, Hist. of the Roy. Soc. I, 3, p. 12). Newton wiederholte Grimaldis Versuche und erweiterte sie wesentlich, indem er auch monochromatisches Licht aus den Spektralfarben anwandte (Optice III, p. 267ff.) und ebenfalls die Beugung nachweisen konnte. De l'Isle benutzte nun die Beugung, um dadurch den bei totalen Mondfinsternissen beobachteten hellen Ring zu erklären, der bis dahin als ein Beweis für eine Mondatmosphäre angesehen war (Mém. Paris 1715). Maraldi (1665–1729) hat in einer ausgedehnten Untersuchung auch die Streifen in dem Kernschatten nachgewiesen (Mém. Paris 1723). Hierher gehört auch eine Reihe von Beobachtungen, welche Dechales (1621—1678) anstellte mit polierten Metallplatten, auf welche er eine Reihe eng aneinander liegender Ritzen eingezogen hatte; ließ er auf diese Platte im dunklen Zimmer das durch ein enges Loch einfallende

Sonnenlicht fallen, so erzeugte er auf einem weißen Schirme ein Spektrum. Er wiederholte die gleichen Versuche mit einer geritzten Glasplatte, um damit zu beweisen, daß das Spektrum nicht durch Brechung entstanden sei. Es ist dies also die erste Wiederholung und genauere Untersuchung der Grimaldischen Versuche (Mundus mathematicus III, p. 736ff., 1690, posthum); aber seine Erklärung ist verfehlt, da er von der Newtonschen Theorie ausgeht und meint, die verschiedene Stärke des Lichtes bedinge die Farbenwirkung. Achtzig Jahre vergingen, ohne daß ein Fortschritt erzielt wurde.

Am 12. November 1801 hielt Th. Young (1773—1831) seine Bakerian Lecture: On the Theory of light and colours (Phil. Trans. 1801). Er zitiert die Beobachtungen von Grimaldi und Maraldi, beruft sich zur Rechtfertigung seiner Annahme der Wellenbewegung auf einige Aussprüche Newtons, die der Undulationstheorie günstig sind, und zeigt, daß man die Streifen im Schatten eines dünnen Körpers durch Diaphragmen beseitigen kann. Dann betrachtet er die Kanten des Schatten gebenden Körpers als Ausgangspunkte von Wellen, die sich nach allen Seiten gleichmäßig fortpflanzen, und zeigt nun, daß diese Wellen interferieren, indem Wellen, die um die halbe Wellenlänge unterschieden sind, bei gleicher Intensität im Zusammentreffen an einem Punkte sich aufheben und so dunkle Streifen erzeugen müssen. Aus dem Abstand dieser Streifen will er die Wellenlänge messen. Aber wegen mangelhafter mathematischer Begründung blieb seine Theorie fast unwirksam.

Fresnel (1788—1827) erweiterte zunächst die Youngschen Beobachtungen (Ann. de Chim. et de Phys. 1816, I, p. 239), indem er nicht nur die Beugungserscheinungen in weißem Licht, sondern auch mit rotem wiederholte und nachwies, daß die durch Interferenz entstehenden Hyperbeln der dunklen Streifen genau der Theorie entsprechen. Durch Arago (1786—1853) wurde Fresnel auch mit der Youngschen Anschauung über Polarisation bekannt, aber zunächst hielt er noch an der Vorstellung longitudinaler Schwingungen fest. Mit Arago fand er die beiden Gesetze: Zwei in gleicher Ebene polarisierte Strahlen interferieren wie gewöhnliches Licht, aber zwei senkrecht zueinander polarisierte Strahlen interferieren überhaupt nicht (Ann. de Chim. et de Phys. 10, 1819). Erst seit 1821 stellt er sich auf den Boden der Transversalschwingungen des Lichtes und stellt die hierauf gegründete Theorie in der Arbeit De la lumière dar (Suppl. zu der Riffaultschen Übersetzung des Traité de Chimie von Thomson, Paris 1822). In dieser Arbeit wird auch der Fresnelsche Spiegelversuch ausführlich wiederholt, nach-

dem er in Ann. de Chim. et de Phys. 17, p. 180, 1822, zuerst veröffentlicht war, wodurch er die Wellenlänge zu messen imstande war. — Die bequeme Methode, die Spiegel richtig einzustellen mit Hilfe einer übergelegten Spiegelglasplatte ist von Nörrenberg (1787—1862) angegeben (cf. Pogg. Ann. 132, p. 42, 1867).

Für die Nachweisung der Interferenz hat Fresnel auch das Interferenzprisma (Biprisma), d. h. ein Prisma mit sehr stumpfem brechenden Winkel, erfunden. Der Lichtstrahl halbiert diesen Winkel (Mém. Paris 5, p. 419; Oeuv. I, p. 330). Lloyd zeigt, daß mit einem einzigen Spiegel Interferenzstreifen erzeugt werden können (Irish Trans. 17, p. 171, 1837). Brewster läßt das Licht durch zwei dicke, wenig gegeneinander geneigte Glasplatten gehen (Treatise on Optics, 1831, p. 111). Das führte Jamin (1818—1886) zur Konstruktion seines bekannten Interferenzrefraktometers mit zwei dicken, parallelen Glasplatten, wo der Unterschied in der Dicke die Interferenz bedingt (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 52, p. 163, und 59, p. 282, 1856/58). Eine Verbesserung des Jaminschen Apparats war die Versilberung der Außenseiten der Platten durch Quincke (Pogg. Ann. 132, p. 29, 1867). Manche Abänderungen an dem Jaminschen Apparat sind unternommen, ohne immer Verbesserungen zu sein. Mit dem Spektralapparat zeigte von Wrede die Interferenz der von der Vorderseite und Innenseite reflektierten Strahlen eines Zylinders aus dünnen Glimmerblättchen (Pogg. Ann. 33, p. 353, speziell 366, 1834) zu einer Zeit, wo Brewster und Biot die Undulationstheorie noch energisch ablehnten.

In einer größeren Reihe von Arbeiten beschäftigt Fresnel sich mit der Doppelbrechung und der Polarisation, indem er den Nachweis für den ordentlichen und außerordentlichen Strahl erbringt, daß die aufeinander senkrecht stehenden Schwingungsebenen der beiden Strahlen die Erscheinungen vollständig erklären (Ann. de Chim. et de Phys. 17, p. 80 u. 393, 1822). In einer erst nach seinem Tode erschienenen Abhandlung findet er den Polarisationswinkel, dessen Tangente gleich dem Brechungsexponenten ist (Ann. de Chim. et de Phys. 46, 1830), was vor ihm schon Brewster (Phil. Trans. 1815) gefunden hatte.

Polarisation.

Die schon erwähnte Arbeit von Malus gab den Abschluß einer Untersuchung, die Malus 1808, durch eine zufällige Beobachtung veranlaßt, über die Polarisation eines von einer Glasfläche reflek-

tierten Sonnenstrahls machte, welchen er durch einen Doppelspat beobachtete (Bull. Soc. phil. I, 15, 1809). Er fand, daß nur bei einem bestimmten Winkel des reflektierten Strahles diese Polarisation vollständig war, so daß das Licht bei geeigneter Lage des Kalkspats völlig ausgelöscht wurde. In einer Reihe von weiteren Arbeiten in derselben Zeitschrift untersuchte Malus die Polarisation des reflektierten Lichtes genauer und faßte seine Resultate endlich in der Preisschrift Théorie de la double réfraction, 1810 (erschienen in Mém. Sav. étr. II, 1811) zusammen. Er bestimmte den Polarisationswinkel für Glas zu 55° und zeigte durch den Versuch mit zwei Spiegeln, daß das Licht bei gekreuzten Spiegeln ebenso zum Verschwinden gebracht werden könne wie mit dem Doppelspat. Was Malus so mit zwei an Stativen befestigten Spiegeln nachwies, ist dann durch den Nörrenbergschen Apparat (Naturf.-Vers. Karlsruhe 1858, p. 152) leichter zugänglich gemacht. Nörrenberg hat mit einer primitiven Anordnung der beiden Spiegel schon 1833 gearbeitet und Kalkspat und Gipsplatten im polarisierten Lichte untersucht (Pogg. Ann. 29, 1833, und 35, p. 596, 1835), dann den vollständigen Apparat in der ersten Auflage von Müller-Pouillet bekannt gemacht. Die heute noch benutzte Form zeigte Nörrenberg in Karlsruhe 1858. Malus fand endlich auch, daß der gebrochene Strahl ebenfalls teilweise polarisiert ist und daß die Polarisationsebene des gebrochenen Strahls senkrecht steht auf der des reflektierten (Mém. Paris 1810, p. 105).

Diese von Malus gefundenen Tatsachen wurden von Fresnel weiter ergänzt durch die Entdeckung der zirkularen Polarisation im Kristallglas von St. Gobain nach dreimaliger Reflexion im Innern des Blockes und durch Auffindung der elliptisch polarisierten Lichtstrahlen bei Reflexion an Metallflächen (Ann. de Chim. et de Phys. 46, p. 225, 1830). Er entwickelte hierbei eine Theorie der Reflexion und Brechung des polarisierten Lichtes unter der Annahme, daß bei der Doppelbrechung die Schwingungen des ordentlichen Strahls senkrecht zum Hauptschnitt des Kristalls, die des außerordentlichen im Hauptschnitt stattfinden.

In etwas anderem Sinne als Fresnel faßt Brewster (Phil. Trans. 1830, II, p. 287) die elliptische Polarisation auf, jedoch hat F. Neumann (1798—1895) nachgewiesen, daß es sich wirklich um elliptisch polarisiertes Licht im Sinne der Fresnelschen Theorie handelt (Pogg. Ann. 26, p. 89, und 40, p. 501, 1832 u. 1840). Aus der großen Zahl der Forscher, welche sich mit dieser elliptischen Polarisation beschäftigt haben, nenne ich Jamin (Ann. de Chim.

et de Phys. Ser. 3, 19, 1897, und 22, 1848), der Fresnels Theorie bestätigte; Cauchy (1789—1857) stellte eine andere Formel für die elliptisch polarisierten Strahlen auf (Pogg. Ann. 91, p. 561; 92, p. 402, 1954; 128, p. 360, 1866), welche von Quincke geprüft wurde (ib.).

Eine erhebliche Rolle hierbei spielt das Eindringen des Lichtes in die reflektierende Substanz, welches schon von Newton bei der Totalreflexion festgestellt war (Optice II, 1 u. 2). Von Fresnel wurde dies Eindringen bei der Totalreflexion an zwei rechtwinkligen Prismen, von denen das eine als Hypotenusenfläche sphärische Begrenzung hatte, genauer studiert (Bib. univ. Genf 22, 1823) und von Stokes (1819—1903) mit polarisiertem Licht untersucht (Camb. Trans. 8, 5, 1848). Quincke (1834—1924) fand die Abhängigkeit von dem Einfallswinkel und die Phasenänderung bei totaler und metallischer Reflexion (Pogg. Ann. 127, p. 1, 1866, und 132, p. 569, 1867). An Kettelers Theorie der zirkular und elliptisch polarisierenden Medien (Wied. Ann. 16, p. 86, 1882) knüpfte sich eine längere Diskussion mit W. Voigt (1850—1920), die sich bis Wied. Ann. 50, p. 377, 1893 hinzog, aus der die Theorie Voigts (ib. 23, p. 104, 1884; 24, p. 156; 25, p. 95, und 43, p. 410) besonders hervorgehoben sei. Eine Vergleichung der Cauchyschen (C. R. 8, p. 560, 1837) und Voigtschen Theorie gab Drude (1863—1906; (ib. 35, p. 508, 1888). Drude behandelte ausführlich die Bedeutung der Oberflächenschichten (ib. 36, p. 532 u. 865, und 43, p. 126, und 50, p. 595, 1893, und 51, p. 77, 1894).

Die oben angegebene Annahme Fresnels über die Schwingungsrichtung der polarisierten Strahlen war eine Folge seiner Vorstellung von dem Zustand des Äthers, daß seine verschiedene Dichte bei konstanter Elastizität die Ursache der Reflexion und Brechung sei. Demgegenüber hatte Fr. Neumann die Auffassung, daß die Dichte des Äthers überall konstant, aber die Elastizität verschieden sei. Dann wäre nach Neumann (Pogg. Ann. 25, p. 418, 1832; 26, p. 89, 1835; 40, p. 497, 1837) die Schwingung des ordentlichen Strahles der Hauptebene parallel und die des außerordentlichen senkrecht dazu. Die Entscheidung zwischen diesen beiden suchten viele Physiker nachzuweisen, allein die Beweise waren nicht stichhaltig. Eine Reihe von Forschern wollte Fresnels Hypothese beweisen, z. B. Ångström, Stokes, Lorenz, Mascart, Cauchy usw. Andere behaupteten, Neumann habe recht, z. B. Babinet, Jamin, Quincke usw. Erst durch die elektromagnetische Lichttheorie wurde klar, daß eine solche Entscheidung auf optischem Wege un-

möglich ist, da für den einen Strahl ein elektrischer Vektor, für den anderen senkrecht dazu ein magnetischer Vektor wirksam ist. Die Theorie Neumanns der elliptischen Polarisation an Metallflächen (s. oben) geht von den Brewsterschen Beobachtungen aus und wird auf folgenden beiden Voraussetzungen aufgebaut, die schon Brewster (Phil. Trans. 1830) an die Spitze gestellt hatte: 1. Die Intensität eines von der Metallfläche reflektierten polarisierten Lichtstrahls ist bei demselben Einfallswinkel verschieden, je nachdem seine Polarisationsebene in der Reflexionsebene liegt oder senkrecht gegen diese steht. 2. Zwei von einer Metallfläche reflektierte Strahlen, wovon der eine parallel, der andere senkrecht gegen die Reflexionsebene polarisiert ist, verhalten sich so, daß der, welcher parallel der Reflexionsebene polarisiert ist, dem anderen um einen Bruchteil einer Undulationslänge voraus ist (Pogg. Ann. 26, p. 89, 1832).

Die Cauchysche Theorie ist von Glan weiter ausgebaut (Pogg. Ann. 155, p. 1 u. 258; 156, p. 235, 1875) und von Drude mit der Voigtschen verglichen (s. oben). Jedoch hat Cauchy selbst seine Theorie zweimal geändert. Cauchy ist ausgegangen von der Untersuchung Naviers (1785—1836) über die Schwingung eines Teilchens von einem festen elastischen Körper. Da Fresnel bei seinem Übergang zu Transversalwellen den Äther als einen festen Körper voraussetzte (1821, s. oben), war es notwendig, auf dieser Grundlage die Schwingungsgleichung zu entwickeln. Das tat Navier in demselben Jahre, doch ist die Arbeit erst 1827 (Mém. Paris 7, p. 375) erschienen. Er setzt voraus, daß der Körper aus einer großen Zahl von Partikeln bestehe, welche aufeinander in Richtung der Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte wirken mit einer von dieser Distanz abhängigen Kraft. Cauchy führte in diese Betrachtung noch eine Konstante ein, welche das Verhältnis des Druckes zu der dadurch hervorgerufenen kubischen Kompression (Modul der Kompression) ausdrückt und wandte die Bewegungsgleichung an auf kristallinische Substanzen (Exerc. de Math. III, p. 188, 1828). Diese Theorie wendet Cauchy auf Kristalloptik an (Mém. Paris 10, p. 293, 1830). Die Resultate, welche er da ableitet, sind denjenigen von F. Neumann (Pogg. Ann. 25, p. 418, 1832) abgeleiteten völlig gleich und stellen die erste Theorie Cauchys dar. Danach schwingen die Ätherteile parallel zur Polarisationsebene. In der zweiten Theorie setzt er ebenfalls voraus, daß die Wellenoberflächen in Projektion auf die Koordinatenebenen Kreise oder Ellipsen geben, aber jetzt sollen die Schwingungen senkrecht stehen auf der Polarisationsebene (C. R. 2, p. 341, 1836; Mém. Paris 18, p. 153, 1839). Beide Theorien Cauchys hatten

große Schwierigkeiten; denn seine Gleichungen ließen noch einen dritten Wellentyp zu, den der longitudinalen Wellen, die durch keine Beobachtung nachgewiesen waren, die Konstanten seiner Gleichungen hatten keine physikalische Bedeutung und endlich war es schwierig, Reflexion und Refraktion damit in Einklang zu bringen.

Für diese beiden Vorgänge erschienen gleichzeitig die Theorien von Mac Cullagh (1809—1847) in Brit. Assoc. 1835, und F. Neumann (Abhandl. Berlin 1835, p. 1, herausg. 1837). Beide setzen voraus, daß die Trägheit des das Licht tragenden Mediums überall die gleiche ist, aber die Elastizität ist in den verschiedenen Medien verschieden, dadurch erhalten sie das Fresnelsche Sinus- und Tangensgesetz. Green (1793—1841) ging von diesen Gesetzen aus und bestimmte die Oberflächenbedingungen von wirklichen festen, elastischen Körpern und leitet aus dem Potential für die Einheit des Volumens die allgemeine Differentialgleichung ab. Werden dann die Schwingungen senkrecht zur Inzidenzebene angenommen, so ergeben sich die Fresnelschen Gesetze, wenn die Dichte in den verschiedenen Körpern verschieden ist (Trans. Cambr. 1838; Ges. Werke, p. 245). Angewandt auf polarisiertes Licht, ergab sich bei der Reflexion die Entstehung longitudinaler Wellen, auch stimmte das Verhältnis der Intensität des reflektierten Lichtes zum einfallenden nicht mit dem Tangentengesetz überein. Das veranlaßte Mac Cullagh (Coll. Works, p. 145) eine neue Theorie auf dynamischer Grundlage aufzustellen, wobei er annahm, daß die Energie allein abhänge von der Rotation des Volumelements; solche Körper nennt er „rotationally elastic". Die Bewegungsgleichung, welche er mit dieser Annahme ableitet, geht ohne Schwierigkeit in die elektromagnetische Lichttheorie (s. unten) ein. Die Schwierigkeit, welche diese Annahme des rotationalen Äthers darstellt, wurde gehoben durch Sir W. Thomson (1824—1907), der eine Struktur angab, welche die Bedingungen erfüllte (C. R., 16. Sept. 1889, Proc. Edinb. 1890, Ges. Werke III, p. 466 u. 468).

Die Greensche Arbeit veranlaßte auch Cauchy, eine neue Theorie (die dritte) für die Reflexion aufzustellen (C. R. 9, p. 676 u. 726, 1839). Die Bewegungsgleichung der ersten Cauchyschen Theorie läßt sich in moderner Schreibweise so schreiben:

$$\varrho \ddot{e} = -\left(K + \frac{4}{3} n\right) \text{grad div } a - n \text{ rot rot } a\,,$$

wo ϱ die Dichte des Mediums, e der Vektor der Verschiebung, n der Torsionskoeffizient, K der Kompressionsmodul ist. Jetzt setzt

Cauchy in dieser Gleichung die Bedingung $\left(K + \frac{4}{3} n\right) = 0$, dadurch erreicht er, daß die longitudinale Welle die Geschwindigkeit 0 erhält. Nimmt man dann noch an, daß n für den Äther in allen Medien gleich ist, so gehorcht der reflektierte Strahl dem Sinus- und Tangensgesetz Fresnels. Für diesen Cauchyschen Äther hat Thomson die Bezeichnung kontraktiler Äther eingeführt (Phil. Mag. 26, p. 414, 1888); denn er ist anzusehen wie ein elastisches Medium mit negativer Zusammendrückbarkeit. Dann zeigte Glazebrook, daß, wenn man mit dieser Annahme des Verschwindens der longitudinalen Wellen die Annahme von Rankine (Phil. Mag., Ser. 4, 1, p. 441, 1851), daß die Trägheit (inertia) des Äthers in einem Kristall nach den verschiedenen Richtungen verschieden ist, verbindet, die Erscheinungen der Kristalloptik durch die Theorie richtig wiedergegeben werden (Phil. Mag. 26, p. 521, 1888, und 28, p. 110, 1889). Die weiteren Fortschritte sind der elektromagnetischen Lichttheorie zu danken (s. unten). Es sei nur darauf noch hingewiesen, daß Kirchhoff (1824—1887) eine ganz allgemeine Ableitung der Bewegungsgleichungen des Äthers in kristallinischen Medien gefunden hat unter der Voraussetzung, daß der Äther ein homogener, elastischer, fester Körper ist, auf dessen Teile nur die durch in relativen Verschiebungen erzeugten Kräfte wirken, daß die Dichtigkeit des Äthers konstant ist, daß aber an der Grenze zweier Medien Druckkräfte auftreten, welche von der Wirkung der materiellen Teile der Medien auf den Äther herrühren (Abh. Berlin 1876, p. 57).

Polarisationsapparate.

Außer dem auf Reflexion beruhenden Nörrenbergschen Polarisationsapparat sind auch mit doppelbrechenden Kristallen derartige Apparate hergestellt. Im Jahre 1815 hatte Biot gefunden (Bull. d. l. Soc. phil. 1815), daß der Turmalin die Eigenschaft hat, den ordentlichen Strahl zu absorbieren und nur den außerordentlichen durchzulassen. Darauf schnitt Marx (Schweigg. Journ. 49, 1826) aus einem Turmalin zwei planparallele Platten, die der Achse parallel waren, aus. Dreht man die eine Platte um 90° gegen die erste, so geht kein Licht durch die zweite. Die heute noch angewendete Form ist die der Turmalinzange, störend wirkt nur die mehr oder weniger starke Färbung der Platten.

Dieses Hindernis ist bei dem Doppelspat nicht vorhanden. Derselbe wurde zuerst von Nicol benutzt, um einen Polarisations-

apparat zu konstruieren. Zunächst stellte er nur das nach ihm benannte Prisma her aus den zwei Keilen mit den entgegengesetzt liegenden, parallelen, brechenden Kanten, die durch Kanadabalsam aneinander gekittet waren (Pogg. Ann. 29, p. 182, 1833). Die Verbindung zweier solcher Prismen zu einem Apparat wurde erst später von ihm ausgeführt (ib. 49, p. 238, 1840).

Während hier der außerordentliche Strahl allein austritt, ist in dem von Sénarmont (1808—1862) hergestellten Kalkspatprisma der ordentliche Strahl benutzt, indem er das erste Prisma so schneidet, daß die Achse des Kristalls senkrecht zur Eintrittsfläche steht, in dem zweiten Prisma, dessen Hypotenuse an der des ersten liegt, ist die Achse parallel der Austrittsfläche, so daß der Lichtstrahl durch das erste unpolarisiert und ungebrochen bis zur Grenze durchgeht, hier geht der ordentliche ungebrochen durch das zweite weiter, der außerordentliche wird abgelenkt und beim Austritt aus dem zweiten nochmals in gleicher Richtung abgelenkt, so hat man den ordentlichen Strahl völlig achromatisch (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 28, 1850, und 50, p. 480, 1857; cf. Liouv. Journ. math. 1, 1856, und Nouv. ann. math. 16, 1857).

Zu einem ganz anderen Zwecke hatte Rochon (1808—1862) ähnliche Zusammensetzung solcher Prismen aus Bergkristall in seinem Mikrometer genannten Apparat verwendet (Journ. d. Phys. 53, p. 192, 1801; 72, 1811). Das erste rechtwinklige Prisma ist so geschnitten, daß die Achse des Kristalls senkrecht zur Eintrittsfläche steht, das zweite aber so, daß die Achse senkrecht auf dem einfallenden Strahl und der Grundfläche des Prismas steht, also parallel der brechenden Kante ist. Beide Prismen geben, mit den Hypotenusen zusammengelegt, ein rechtwinkliges Parallelepiped. Auch hier geht der einfallende Strahl ungebrochen bis zur Hypotenuse; dort tritt die Doppelbrechung ein und der außerordentliche wird abgelenkt. Nun läßt Rochon durch eine Linse die Strahlen auf den so zusammengefaßten Kristall fallen und erzeugt auf einem Schirm die beiden Bilder. Durch eine Schraube kann man die Kristallkombination so verschieben, daß die beiden Bilder sich berühren und aus den gemessenen Abständen von der Hauptebene kann man bei bekannter Größe des Objekts seine Entfernung und umgekehrt berechnen. Natürlich kann man die Rochonsche Konstruktion der Kristalle auch zu Polarisationsuntersuchungen benutzen.

Mit dem Nicolschen Prisma verbesserte Nörrenberg (1787 bis 1862) seinen Apparat, indem er den Spiegel nur als Polarisator

benutzte, aber zum Analysator ein Nicolsches Prisma anwandte und zur Untersuchung von Platten eine Tragfläche einführte.

Die älteren Polarisationsapparate waren Polariskope, d. h. sie wollten nur den Nachweis erbringen, daß eine Polarisation vorhanden sei. Wohl das erste dieser Art ist das von A. Seebeck (1770—1831), nach Art des Wollastonschen Goniometers gebaut, nur daß an die Stelle des Kristalls der Spiegel gesetzt ist und an die Stelle des Okulars ein Kalkspat (Pogg. Ann. 20, p. 27, 1830). Zwei gekreuzte Turmalinplatten sind wohl zuerst von John Herschel (1792—1871) als Polarisationsapparat gebraucht (Phil. Trans. 1820). Dann wurden sie von Joh. Müller (1809—1875) angewandt (Pogg. Ann. 35, p. 261, 1835) mit der bekannten Drahtzange. In demselben Jahre konstruierte Dove (1803—1879) seinen bekannten Apparat mit zwei Nicolschen Prismen und Kreisteilung an dem Polarisator, auf welchen durch eine Linse das Licht fiel (Pogg. Ann. 35, p. 596, 1835). Ein eigenartiges Polariskop stellte Savart (1791—1848) her aus zwei Bergkristallplatten, deren eine unter einem Winkel von $38^0\ 20'$ gegen die Hauptachse des Kristalls geschnitten war, während die andere hierzu senkrecht geschnitten war. Davor brachte er eine Turmalinplatte an, deren Achse den Winkel jener halbierte. Geht durch diese Kombination linear polarisiertes Licht, so sieht man farbige Streifen (Pogg. Ann. 49, p. 292, 1840). Brewster nannte seinen Apparat Polarisationsmikroskop; es unterscheidet sich von dem verbesserten Nörrenbergschen nur dadurch, daß als Polarisator auch ein Nicol gesetzt ist (Rep. of 10 Meet. of the Brit. Assoc., p. 10, 1841). Ebenso brachte Baden-Powell (Phil. Mag., Ser. 3, 22, p. 241) als Verbesserung an dem Nörrenbergschen nur eine Vorrichtung an, um eine Flüssigkeitsröhre zwischen Polarisator und Analysator zu setzen. Um auch bei sehr kleinen Kristallamellen beobachten zu können, verband Amici mit dem Nörrenbergschen Apparat ein Mikroskop von beiläufig fünffacher Vergrößerung, dessen Okular einen Doppelspat trug, so daß man den ordentlichen und außerordentlichen Strahl messen konnte (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 12, p. 114, 1844). Bravais (1811 bis 1863) verband den Fresnelschen Kalkspat mit dem Babinetschen Kompensator (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 43, p. 129, 1855). Letzterer ist wohl zuerst von Babinet (1794—1872, C. R. 29, p. 514, 1849) bekannt gemacht, dann aber eingehend von Jamin (1818—1886) beschrieben und in der zu Messungen geeigneten Form angewandt (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 29, 1850). Die weiteren Verhandlungen über die Zuverlässigkeit der Messung mit

diesen Quarzplatten, deren Hauptschnitte senkrecht aufeinander stehen, sind durch eine Antwort Jamins zugunsten des Kompensators entschieden (Pogg. Ann. 127, p. 212, 1866; 132, p. 37 u. 204, 1867; Wied. Ann. 22, p. 232, 1884; 45, p. 377, 1892). Dove hat seinen Polarisationsapparat dann noch dadurch verbessert, daß er den Polarisator nicht aus einem Nicol bestehen ließ, sondern ein rechtwinkliges Kalkspatprisma, dessen eine Kathetenfläche parallel der Achse des Kristalles geschnitten war, anwandte (Pogg. Ann. 122, p. 18 u. 456, 1864). Er ließ das Licht senkrecht zu dieser Fläche eintreten und total reflektieren.

Zweiachsige Kristalle.

Für zweiachsige Kristalle fand Hamilton (1805—1865) aus der theoretischen Betrachtung der Berührung der zu einer der optischen Achsen senkrechten Wellenebenen mit der durch die Elastizität bedingten Wellenfläche in einem zweiachsigen Kristall, daß der in Richtung einer Achse auf eine senkrecht zu dieser Achse geschliffene Grenzfläche einfallende Lichtstrahl in dem Kristall sich zu einem Strahlenkegelmantel umwandeln muß, so daß aus einer parallelen Austrittsfläche nicht wieder ein Lichtstrahl austritt, sondern ein Lichtkreis, und dieser Lichtkreis behält bei der Fortpflanzung in der Luft dann den Radius konstant bei. Diese Erscheinung nennt Hamilton die konische Refraktion (Pogg. Ann. 28, p. 91, 1833). Nimmt man statt des einen betrachteten Strahles ein paralleles Strahlenbündel, so entspricht die Breite des Strahlenringes beim Austritt der Breite des eintretenden Strahls. Die gleiche Erscheinung tritt ein, wenn der eintretende Strahl in Richtung der sekundären Achsen einfällt. Zuerst ist die konische Refraktion am Aragonit nachgewiesen von Lloyd (Irish. Trans. 17, p. 145, 1833). Die weiteren Untersuchungen, besonders auf dem Salpeter (ib. 37, 85 usw.), haben mehr kristallographisches Interesse. Die Polarisation bei konischer Refraktion untersuchte Beer (1825 bis 1863, Pogg. Ann. 83, p. 194; 85, p. 67, 1852).

Der Einfluß der Temperatur auf die Lage der Achsen ist zuerst bei den zweiachsigen Kristallen entdeckt. Mitscherlich beobachtete bei dem klinorhombischen Gips, daß bei der Erwärmung der Winkel der Achsen von 95 auf 115° stieg. Weitere Erwärmung war nicht mehr zu verfolgen, weil der Gips dann undurchsichtig wurde (Pogg. Ann. 8, p. 126, 1826). Diese Erscheinung wurde von Brewster (Phil. Mag., Ser. 2, 1, p. 417, 1833) weiter verfolgt und

auf mehrere zweiachsige Kristalle ausgedehnt. Bei einachsigen Kristallen fand den Temperatureinfluß Fizeau (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 4, 2, p. 177, 1864), und zwar beim Doppelspat, der bei Erwärmung die Doppelbrechung vermindert, sich also der Isotropie nähert. Gleiches Resultat, aber auf entgegengesetztem Wege, fand Dufat (Journ. de Phys., Ser. 2, 3, p. 251, 1884).

Interferenz des polarisierten Lichtes.

Die Interferenz des polarisierten Lichtes ist zuerst von Arago entdeckt, indem er einen linearpolarisierten Lichtstrahl durch eine Platte, welche nicht isotrop war, gehen ließ, die beiden durch Doppelbrechung entstandenen Strahlen interferieren, wenn man sie in die gleiche Ebene bringt, und der Grad dieser Interferenz hängt von der Wellenlänge ab (Mém. Paris 12, p. 93, 1812). Da Arago mit weißem Licht arbeitete, bekam er natürlich Farbenerscheinungen. Er nennt daher diese Polarisationserscheinungen Polarisation colorée. Daß er hier die Polarisation chromatique mit der Polarisation rotatoire zusammenwarf, ist erst durch Fresnel (s. unten) klargestellt. In sehr ausgedehnten Untersuchungen hat Biot eine große Zahl von ein- und zweiachsigen Kristallen in Platten behandelt mit Hilfe eines dem Nörrenbergschen Apparat ähnelnden, aber sehr unbeholfenen Apparats (Mém. Paris 12, p. 135; 13, I, p. 1 u. II, p. 1 u. 31, 1812—1814) und den Einfluß der Plattendicke auf die Färbung nachgewiesen. Da Biot auf dem Newtonschen Standpunkt stand, ist seine weitläufige Erklärung natürlich verfehlt (Traité de phys. 4, p. 325, 1816). Erst Fresnel gab eine ausführliche Erklärung der bis dahin beobachteten Erscheinungen (Oeuvres I, p. 394, 495, 523 usw.). Ich hebe hervor, daß in den Untersuchungen Biots zum ersten Male auch der Rohrzucker beobachtet ist. Daß auch organische Substanzen die Doppelbrechung zeigen, hatten schon Malus (Mém. Paris 11, II, p. 142, 1810) und Brewster (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 2, 4, p. 431, 1817) an vielen Substanzen beobachtet. Nachdem Biot die absorbierende Eigenschaft des Turmalins für den ordentlichen Strahl entdeckt hatte (Ann. de Chim. 94, p. 191, 1815), benutzte er durchweg zwei Turmalinplatten (s. oben). Die Enge des Gesichtsfeldes bei dieser Methode ist wesentlich gehoben durch Bertin (1818—1884, Journ. de phys. 10, p. 116, 1881). Gleichzeitig mit Biot stellte Brewster Polarisationsbeobachtungen an und stellte dabei fest, daß planparallele Platten aus einachsigen Kristallen, senkrecht zur Achse geschnitten, für das

ordentliche Bild die Ringe mit weißem Kreuz zeigen, wenn Polarisator und Analysator parallel sind; dagegen schwarzes Kreuz für das außerordentliche Bild, umgekehrt bei gekreuzten Nicols (Treatise on new phil. inst., p. 336, 1813). Er beobachtete auch mit weißem Licht, hatte also auch die farbigen Ringe mit den Komplementärfarben beobachtet. Die vollständige Theorie dieser Erscheinungen auf Grund der Fresnelschen Theorien gab Airy (1801—1892; Camb. Trans. 4, I, p. 79 u. 198, 1831). Abweichungen von der für einachsige Kristalle allgemeingültigen Theorie erklärt er durch besondere Dispersionsverhältnisse des außerordentlichen Strahles. Dahin gehören die Erscheinungen am Apophyllit, der für blaues Licht positiv doppelbrechend, für rotes negativ doppelbrechend, für grünes einfach brechend gefunden wurde von John Herschel (Camb. Trans. I, 1821).

In demselben Jahre, als Airy diese Theorie entwickelte, entdeckte Talbot (1800—1877) die nach ihm benannten Interferenzstreifen im Diffraktionsspektrum mit Hilfe des vor das Okular von der violetten Seite her eingeschobenen Deckgläschens (Phil. Mag., Ser. 2, 10, 1831). Die Erklärung gab ebenfalls Airy (Pogg. Ann. 53) p. 459, 572, 1841, und 58, p. 535, 1843). Esselbach (1832—1864, benutzte dieselben, um Wellenlängen im Ultraviolett zu messen (Pogg. Ann. 98, p. 513, 1856); Stefan zeigte verschiedene Methoden zur Erzeugung der Streifen (ib. 123, p. 509, 1864) und Dvorak (1848—1922) gab eine ausführliche Ableitung (ib. 150, p. 399, 1873). Den Talbotschen Streifen ähnliche Interferenzstreifen treten auf beim Durchgang des linear polarisierten Lichtes durch einachsige Kristallplatten, welche parallel zur Achse geschnitten sind. Auch diese sind schon experimentell untersucht durch Biot (l. c.), ohne eine Erklärung zu finden. Erst Joh. Müller gab eine vollständige Theorie für die hierbei auftretenden Hyperbeln und zeigte, daß die Phasendifferenz nicht nur von der Neigung des einfallenden Strahles, sondern auch von der Lage der Einfallsebene abhängig ist (Pogg. Ann. 33, p. 283, 1834; 35, p. 95, 1835).

Auch an zweiachsigen Kristallen sind diese Interferenzerscheinungen schon von Biot beobachtet (l. c.); aber es hat sich gezeigt, daß allgemeine Gesetze nicht gefunden sind, sondern die Erscheinungen für jede Kristallform besonders behandelt werden müssen und wesentlich abhängen von dem Winkel der beiden Achsen. Solche Untersuchungen sind zuerst von Rudberg (Pogg. Ann. 17, p. 1, 1829) ausgeführt. Eine Übersicht über die zahlreichen Beobachtungen an verschiedenen Kristallen bis 1858 gibt Grailich,

Kristallogr. optische Untersuchungen, Wien 1858, und weiter Mallard, Traité de Cristallogr., 1884. Die Farbenwechsel beim Drehen von Gips und Glimmerplatten im Polarisationsapparat benutzte Petrina, um sein Kaleidopolariskop zu konstruieren (Pogg. Ann. 49, p. 236, 1840).

Die Eigenschaft des Dichroismus an einachsigen Kristallen ist zuerst von Arago beim Turmalin genauer untersucht (Journ. de Phys. 90, p. 41, 1820), nachdem Beobachtungen der Art schon von Biot (Bull. Soc. philom. 1819, p. 109 u. 132) ohne Erklärung gemacht waren. Ebenso führte Brewster eine Tabelle von 60 Kristallen an, welche die gleiche Erscheinung zeigen (Phil. Trans. 1819, p. 11). Babinet unterschied das Verhalten der positiven und negativen Kristalle und zeigte, daß der Strahl am meisten absorbiert wird, welcher die geringere Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat (C. R. 4, p. 759, 1837). Grailich führte für die Absorption in einem anisotropen Körper das Absorptionsellipsoid ein (Kristalloptische Unters., p. 52, 1858). Eine sehr einfache Ableitung gab Mascart (1837—1908, Traité d'optique, II, p. 208, 1890). Für die bequeme Beobachtung dieser anomalen Absorption hat Haidinger (1795 bis 1871) in seiner dichroiskopischen Lupe einen Apparat gegeben (Pogg. Ann. 65, p. 4, 1845), welcher mit einem gewöhnlichen Polarisationsapparat oder Polarisationsmikroskop verbunden werden kann. Eine andere Beobachtungsmethode, welche beide Bilder nebeneinander legt, ist von Glan in seinem Spektrophotometer dargeboten (Wied. Ann. 1, p. 353, 1877). Die dabei auftretenden Absorptionsbanden sind wohl zuerst von Bunsen (1811—1899) am Didymsulfat beobachtet (Pogg. Ann. 128, p. 100, 1866). Aus der großen Zahl der Untersuchungen dieser Art verweise ich nur noch auf die ausgedehnte Arbeit von H. Becquerel (1852—1908) an Kristallen des klinorhombischen Systems (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 6, 14, p. 170 u. 257, 1888).

Eine Theorie der Absorption in anisotropen Medien ist von W. Voigt aufgestellt (Wied. Ann. 23, p. 577, 1884), von welcher Drude (1863—1906) zeigte, daß sie die bekannten Erscheinungen gut wiedergibt (Ztschr. f. Krist. u. Min. 13, p. 567, 1887). — Daß ähnliche Erscheinungen auch bei Reflexion an solchen Kristallflächen auftreten, hat schon Haidinger (Pogg. Ann. 71, p. 321, 1847) gezeigt. An den polychromen Kristallen hat Brewster die merkwürdige Erscheinung der Flocken (houppes), die mehr oder weniger gefärbt sind, entdeckt (Treatise on opt. II, 1831). Eine Erklärung dieser Erscheinung, welche in bestimmten Fällen auch

noch durch dunkle Streifen kompliziert wird, hat Mallard gegeben (Traité de Christallogr. II, p. 361, 1884).

Der Einfluß der Temperatur auf die Polarisation in zweiachsigen Kristallen ist oben schon erwähnt. Daß auch der Druck isotrope Körper doppeltbrechend macht, ist von Brewster (Phil. Trans. 1815, p. 29 u. 60; 1816, p. 46) erwiesen; daß auch Kristalle unter Druck ihr optisches Verhalten ändern, hat er ebenfalls gezeigt (Edinb. Trans. 8, p. 281, 1817). Wertheim hat dann das Verhältnis der Druckkraft zur doppelten Brechung festgestellt (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 40, p. 156, 1854), während F. Neumann (1798 bis 1895) diese Erscheinungen aus seiner Elastizitätstheorie ableitet (Pogg. Ann. 54, p. 449, 1841).

Drehung der Polarisationsebene.

Schon bei seinen ersten Untersuchungen über Polarisation stellte Arago (Mém. Paris 1811, p. 115) fest, daß von den einachsigen Kristallen der Bergkristall eine besondere Stellung einnehme. Ließ er durch eine 6 mm dicke Platte linear polarisiertes Licht fallen und beobachtete beide Bilder durch den Analysator, so waren beide Bilder komplementär gefärbt. Diese Färbung änderte sich nicht, wenn er die Quarzplatte drehte; wenn er dagegen den Analysator um 180° drehte, so zeigte sich bei beiden Bildern ein Farbenwechsel, so daß doch beide stets komplementär gefärbt blieben; war also das eine Bild zu Anfang rot, so ging diese Farbe bei einem bestimmten Drehungssinn in Orange, Gelb, Grün usw. über bis Violett, um beim Weiterdrehen die gleiche Reihenfolge zu wiederholen. Diese Beobachtungen nahm Biot (Mém. Paris 13, p. 238, 1812) auf und zeigte zunächst, daß die Größe der Drehung, um zu den gleichen Farben zu kommen, direkt proportional der Dicke der Platte ist, welche senkrecht zur Achse geschnitten war, indem er von 0,4 mm bis 11,673 mm Dicke untersuchte. Dann aber entdeckte er, daß es zwei verschiedene Arten des Kristalls gebe, bei der einen muß man, um obige Farbenfolge zu erreichen, den Analysator nach rechts, bei der anderen nach links drehen. In einer späteren Untersuchung mit homogenem Licht fand Biot dann (Mém. Paris 2, p. 41, 1817/19), daß für alle Farben die Proportionalität der Drehung mit der Dicke der Platte bestehen bleibt, aber der Koeffizient für die verschiedenen Farben im umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Wellenlänge der Farbe variiert (Biot sagt natürlich nicht Wellenlänge, sondern gebraucht die Newtonschen

„fits“). Da die Farben in beiden Bildern (vom ordentlichen und außerordentlichen Strahl) stets komplementär sind, kam Biot auf die Youngsche Farbentheorie (s. unten) und bestimmte nun die Farbe des mittleren Gesichtsfeldes, indem er die Kurven bei kontinuierlich wachsender Dicke der Platte für die Farben zeichnet. Er nennt sie herzförmig nach ihrer Gestalt auf einem Farbenkreise. Es ist das die gleiche Methode, welche Maxwell in seinem bekannten Dreieck mit den drei Grundfarben anwandte (Phil. Trans. 1860, p. 57). Die Veränderung der Ringe und des Kreuzes bei der Drehung der Quarzplatten in bezug auf Gestalt und Abstand der Ringe voneinander hat wohl zuerst Airy genauer beschrieben. Ebenso die Entstehung der Spiralen, wenn zwei Quarzplatten, die eine rechts-, die andere linksdrehend, aufeinander gelegt beobachtet werden (Camb. Trans. 4, I, p. 79 u. 198, 1829).

Schon 1815 hatte Biot bemerkt, daß nicht allein Quarz diese Drehung der Polarisationsebene bewirkt; er hatte Licht durch eine Säule von Terebinthenharz gehen lassen in seinem Polarisationsapparat und beobachtete einen ähnlichen, wenn auch nicht so starken Effekt (Bull. soc. philom. 1815, p. 190). Biot hatte für diese Erscheinung ebensowenig eine plausible Erklärung wie für die Quarzplatten. Für beides lieferte Fresnel 1821 eine Theorie (Oeuvres I, p. 655 u. 738), indem man annahm, daß in dem Quarz parallel zur Achse das durchgehende Licht in zwei zirkularpolarisierte Strahlen zerlegt werde, bei denen die Schwingungen rechts herum oder links herum erfolgen, daß aber beide sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen, so zwar, daß in dem rechtsdrehenden Quarz der Strahl mit rechts umlaufender Schwingung schneller sich fortpflanze als der links schwingende. Er konnte die Existenz dieser Strahlen nachweisen. Airy (s. oben) hat dann alle Einzelheiten der Beobachtung mit der Fresnelschen Theorie analysiert.

Bedenken, die von verschiedenen Beobachtern gegen die Fresnelsche Theorie geltend gemacht wurden, hat Cornu (1841—1902) widerlegt und die Theorie auch durch Versuche bestätigt (C. R. 92, p. 1365; 93, p. 809, 1881) und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit beider Strahlen gemessen. Daß durch Temperaturerhöhung die „Rotationskraft“ des Quarzes vergrößert wird, hat schon Dubrunfaut (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 18, p. 106, 1846) nachgewiesen; doch genauere Messungen stellte von Lang (Wien. Ber. 71, p. 707, 1875) an, nachdem er schon früher (l. c. 1869) die Brechungskoeffizienten der beiden Strahlen gemessen hatte. Die widerspruchsvollen Ergebnisse verschiedener Messungen versuchte Sohncke (1842—1897)

durch Annahme der Proportionalität mit einem Ausdruck zweiten Grades von der Temperatur zu heben (Wied. Ann. 3, p. 516, 1878), während Joubert (C. R. 87, p. 497, 1878) eine unregelmäßige Steigerung bis zu einem Maximum bei 500⁰ nachweisen wollte. Le Chatelier vereinigte beide Ansichten, indem von 0—570⁰ das Sohnckesche Gesetz gelten, dann aber eine Allotropie des Quarzes eintreten sollte. Doch ist hierüber das letzte Wort noch nicht gesprochen (C. R. 109, p. 264, 1889).

Aus Quarzplatten hat Soleil (1798—1878) einen empfindlichen Kompensator für zirkular polarisiertes Licht konstruiert. Eine linksdrehende Quarzplatte ist in der Diagonalebene durchgeschnitten, so daß die beiden Keile gegeneinander verschiebbar sind; eine ebenso dicke Platte rechtsdrehenden Quarzes ist auf das erstgenannte Doppelprisma aufgelegt. Geht ein Lichtstrahl durch beide Platten, so hebt die eine die Polarisation der anderen auf, solange die beiden Keile mit ihren Hypotenusen völlig aufeinander liegen. Durch Verschieben des einen Keils kann die Dicke der linksdrehenden Platte kleiner und größer gemacht werden; daher kann man beliebige Grade der „Rotationskraft" herstellen (C. R. 21, p. 426, 1845). Eine ähnliche Konstruktion hat auf Veranlassung von Voigt dann Hecht für elliptisch polarisierte Strahlen gebraucht (Wied. Ann. 20, p. 426, 1883), um die Achsenverhältnisse der Ellipsen zu bestimmen. Daß bei nicht senkrecht zur Achse des Quarzes geschnittenen Platten elliptische Polarisation eintritt, hatte schon Fresnel (l. c.) festgestellt, aber das Verhältnis der Achsen dieser Ellipsen war zuerst von Jamin (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 30, p. 51, 1850) berechnet. In demselben Bande, p. 68, hat Cauchy die Theorie der elliptischen Polarisation entwickelt, welche von Lang eine geringe Abänderung erfuhr (Pogg. Ann., Ergb. 8, p. 622, 1878). Eine wesentlich andere Gleichung für das Achsenverhältnis führte Voigt ein (Wied. Ann. 19, p. 899, 1883).

Eine eigenartige Zusammenstellung von Glimmerplättchen zu einer Säule zur Bestimmung der Polarisation hatte schon Sénarmont (1808—1862) vorgeschlagen und Nörrenberg hat darauf diese Idee ausgeführt (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 34, p. 171, 1852). Von Reusch wurden dann solche Säulen benutzt, um die verschiedenen Polarisationserscheinungen darzustellen, indem er Platten gleicher Dicke, aber sehr verschiedener Anzahl von Glimmerplättchen herstellte (Pogg. Ann. 138, p. 628, 1869). Daß auch die unsichtbaren Wärmestrahlen im Quarz eine solche Drehung der Polarisationsebene erleiden, haben schon Biot und Melloni (C. R. 2, p. 194,

1836) gefunden. De la Provostaye und Desains zeigten dieselbe Eigenschaft auch bei anderen drehenden Substanzen (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 30, p. 267, 1850) und letzterer machte die Experimente genauer, indem er die ultraroten Strahlen anwandte (C. R. 62, p. 1277, 1866, und 84, p. 1056, 1877). Daß auch die Dämpfe solcher Flüssigkeiten, wie Terebinthenessenz die drehende Kraft besitzen, hat schon Biot (Mém. Paris 2, p. 125, 1817/19) bemerkt, und J. Herschel hat versucht, den Nachweis zu erbringen, daß die molekulare Unsymmetrie für die Drehung entscheidend ist (Camb. Trans. 1, p. 47, 1822), ein Gedanke, der in zahlreichen Arbeiten anderer Forscher weiter verfolgt ist (cf. Desains, Leçons de Phys., II, 1865).

Es ist oben schon erwähnt, daß Biot die drehende Kraft des Zuckers bemerkt hatte. Da durch Seebeck nachgewiesen war, daß der Zucker auch in Lösungen diese drehende Kraft besitzt (s. Biot, Traité d. Phys. IV, 1818) und die Stärke der Drehung von dem Zuckergehalt linear abhängt, führte Biot den Begriff des molekularen Drehungsvermögens ein (Mém. Paris 2, p. 125, 1819). Das technische Bedürfnis führte dazu, besondere Apparate für die Untersuchung des Zuckergehalts der Lösungen zu bauen, sogenannte Saccharimeter. Biot arbeitete mit einem schwarzen Spiegel als Polarisator und einem gewöhnlichen Doppelspat als Analysator; dazwischen wurde die Röhre mit der Flüssigkeit gebracht (Mém. Paris 13, p. 129; C. R. 15, p. 523 u. 705, 1842).

Mitscherlich benutzte zwei Nicols, zwischen welche die Röhre mit der Lösung gebracht wurde. Am Okularnicol war eine Kreisteilung angebracht und man mußte auf den Punkt größter Dunkelheit bei homogenem Licht einstellen, der nicht exakt gefunden werden kann. Darum fügte Soleil zwischen Polarisator und Röhre eine Doppelplatte von Quarz (s. oben) ein und zwischen Röhre und Analysator einen Kompensator für zirkulare Schwingungen. Dadurch ist es möglich, auf Farbengleichheit der beiden Bilder sehr exakt einzustellen (C. R. 21, p. 426, 1845, und 24, p. 973, 1847). Große Verbreitung hat das Polaristrobometer von Wild (Pogg. Ann. 122, p. 626, 1864) gefunden. Der Polarisator ist ein Nicol, welches drehbar ist. Nachdem das Licht die Röhre mit der zu untersuchenden Flüssigkeit passiert hat, geht es durch eine Art Savartsches Polariskop, bestehend aus zwei identischen Kalkspatplatten, deren Ebenen mit der Achse den Winkel 45° bilden und deren Hauptschnitte aufeinander senkrecht stehen (Pogg. Ann. 49, p. 292, 1840), um dann durch zwei Linsen nach Galileis Zusammen-

stellung in das analysierende Nicol zu gelangen. Die entstehenden Polarisationsstriche sind scharf einzustellen und darum große Genauigkeit erzielbar. Ein Vergleich der Genauigkeit, die mit dem Soleilschen und Wildschen Apparat erreichbar ist, wurde von Landolt in seinem Bericht über die Raffinierung des Rübenrohzuckers gegeben (Verh. d. V. f. Gewerbefleiß, Berlin 1867). Die späteren Konstruktionen, z. B. von Laurent (Journ. d. Phys. 3, p. 183, 1874) und Poynting (Phil. Mag. 4, p. 18, 1880) bieten physikalisch nichts Neues. Ein „Saccharimètre répétiteur" ist von Nodot (Rev. d. Fran. scienc. 9, p. 638, 1888) angegeben. Hinter dem Polarisator geht das Licht durch zwei entgegengesetzte Quarzplatten gleicher Dicke, dann durch einen Spalt senkrecht auf die Grenze der Platten. Der Okularteil besteht aus Fernrohr mit Gradsichtprisma und Nicolanalysator. Man sieht zwei kannelierte Spektren, die sich genau entsprechen, übereinanderliegend, wenn Polarisator und Analysator parallel sind. Die Verschiebung durch ein eingelegtes drehendes Medium wird durch Drehen des Polarisators ausgeglichen.

Es ist selbstverständlich, daß mit diesen Apparaten auch andere Flüssigkeiten untersucht sind. Es hat sich bei den zahlreichen Beobachtungen, auf welche hier nicht eingegangen werden kann (s. Bouchardat, Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 9, p. 213, 1843), gezeigt, daß es viele Substanzen gibt, die im kristallinischen Zustande keine drehende Kraft zeigen, wohl aber in Lösung (Des Cloizeaux, ib. 51, p. 361, 1857, und 56, p. 219, 1859), während Quarz und kristallisierter Zinnober in Lösung keine Drehung hervorrufen (Des Cloizeaux, C. R. 44, p. 876 u. 909, 1857), so daß also bei diesen die molekulare Anordnung entscheidend ist.

Drehung der Polarisationsebene durch Magnetismus und Elektrizität.

Versuche, zwischen Licht und Magnetismus eine Beziehung zu entdecken, waren nach Entdeckung der Polarisation naheliegend. Frühere, auf philosophischer Grundlage aufgestellte, phantastische Zusammenhänge hatten keinerlei Bedeutung. Aber Morichini glaubte, durch Lichtstrahlen in einzelnen Körpern Magnetismus hervorgerufen zu haben (Quart. Journ. Scienc. 19, p. 338, 1813); ähnliche Versuche stellte S. Christie (1784—1865, Phil. Trans. 1826, p. 219) an und Lady Somerville (ib., p. 132). Aber die Beobachtungen erwiesen sich als unrichtig. J. Herschel sah in der Ablenkung einer Magnet-

nadel durch einen geradlinigen Strom eine Unsymmetrie, die der Unsymmetrie doppelbrechender Kristalle ähnlich sei und so schrieb er: Therefore induction led me to conclude that a similar connexion exists ... between the electric current and polarized light, and that the plane of polarization would be deflexted by magneto-electricity" (s. Jones, Life of Faraday, p. 205). Daraufhin versuchte Faraday (1791—1867) eine Änderung der Polarisation dadurch herbeizuführen, daß er einen polarisierten Lichtstrahl in einen vom Strom durchflossenen Elektrolyten fallen ließ (Exp. res., 951 1834), natürlich mit negativem Erfolg. Im September 1845 aber brachte er ein schweres Flintglas (= kieselsaures Bleioxyd) von 13 mm Dicke und 54 mm Breite zwischen die Pole eines kräftigen Elektromagneten, so daß die Längsrichtung der Platte axial stand. Durch dies Glas ließ er einen polarisierten Lichtstrahl fallen, den er mit dem Analysator untersuchte. Das Glas zeigte keine Wirkung, als aber der Strom im Elektromagneten geschlossen wurde, wurde das bei gekreuzten Nicols dunkle Feld wieder hell, wenn der Lichtstrahl parallel zu den magnetischen Kraftlinien durch das Glas ging (ib., 2152). Durch Drehung des Analysators wurde das Feld wieder dunkel, und zwar, wenn der Analysator beim Nordpol lag, durch Rechtsdrehung.

Zur Verstärkung der Wirkung armierte Edm. Becquerel (C. R. 22, p. 952, 1846) die Pole mit zylindrisch durchbohrten Polschuhen, so daß der Lichtstrahl durch diese Polschuhe hindurchging; dann steigerte sich die Drehung von 6° 30′ zu 25° 6′. Noch stärker wirkt der Ruhmkorffsche Apparat, bei welchem die Eisenkerne ganz durchbohrt sind und das Licht so durch die Achse der Magnete hindurchgeht (C. R. 23, p. 417, 1846). Faraday hatte schon bemerkt, daß die Drehung der Polarisationsebene in demselben Sinne erfolgt, wie der magnetisierende Strom im Rechtsgewinde läuft. Das gab ihm die Veranlassung, auf einfache Weise eine Verstärkung herbeizuführen, indem er den Lichtstrahl mehrere Male in dem Glasprisma an den Endflächen reflektieren ließ durch Versilberung der Begrenzungsflächen mit Ausnahme der kleinen Eintritts- und Austrittsstelle. Daß der Eisenkern nicht nötig ist, um das Magnetfeld zu erzeugen, war schon Faraday (l. c.) bekannt. G. Wiedemann benutzte daher eine Magnetisierungsspirale, in welche er die Soleilsche Röhre steckte, um den Einfluß auf Flüssigkeiten (Schwefelkohlenstoff) zu studieren (Pogg. Ann. 82, p. 215, 1851). Er fand, daß auch hier die Drehung proportional der Stromstärke ist, während die früheren Versuche an anderen Körpern

durchweg mit dem Ruhmkorffschen Apparat ausgeführt sind. Ich erwähne nur die Versuche von Matthiessen (Pogg. Ann. 73, p. 65, 1847, Auszug aus C. R. 24, p. 969; 25, p. 20 u. 173, 1847); Bertin (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 23, p. 5, 1848) und Edm. Becquerel (ib. 28, p. 334, 1850), besonders aber die ausgedehnten Versuche von Verdet (1824—1866, ib. 41, p. 370, 1854, bis 49, p. 415, 1863).

Bertin fand dabei Körper, deren Drehvermögen geringer ist als das des Wassers, z. B. Salze des Eisenoxyduls, und Verdet nannte das Drehvermögen des Wassers und der nichtmagnetischen, durchsichtigen Körper positiv, des Eisenoxyduls und ähnlicher negativ, weil die Drehung bei ersteren im gleichen Sinne erfolgt wie die Richtung des erzeugenden Stromes. Dabei fand Verdet das Gesetz, daß in Lösungen und Gemischen die Substanzen ihr molekulares Drehvermögen beibehalten, also für den Komplex die algebraische Summe der Drehvermögen die Drehung bestimmt. Er bestätigte das schon von Faraday ausgesprochene Gesetz, daß die Drehung der Polarisationsebene proportional ist der Intensität des Magnetfeldes und der Dicke der durchlaufenen Schicht (Exp. reas. 2163/64, 1845).

Der erste Versuch, diese elektromagnetische Drehung theoretisch zu begründen, ist von Airy (Phil. Trans. 28, p. 469, 1846) unternommen auf Grund der Mac Cullaghschen Gleichungen für die Doppelbrechung (s. oben) ohne ein befriedigendes Resultat. Auf Grund der Molekularströme gab C. Neumann (1832—1925) in seiner Doktordissertation (Halle 1858) eine physikalische Erklärung, die ausführlich begründet ist in „Die magnet. Dreh. d. Polar.-Ebene d. L.“, 1863. Für die Weiterführung der Theorie war von Bedeutung die Entdeckung Verdets (C. R. 56, p. 630, 1863), daß die magnetische Drehung nahezu umgekehrt proportional ist dem Quadrat der Wellenlänge, sie gab Boussinesq den Weg zur Aufstellung seiner Gleichungen (Journ. d. Math. 13, p. 430, 1868). — Faraday hatte schon festgestellt, daß das Maximum der Drehung eintrat, wenn der Lichtstrahl parallel den Kraftlinien war; machte er einen Winkel, so fand Bertin (l. c.), daß das Maximum mit dem Kosinus des Neigungswinkels multipliziert werden müsse. Für jeden Punkt eines Magnetfeldes gab dann Maxwell (Electr. and Magn. II, p. 400, 1873) die einfache Beziehung, daß die Drehung zwischen zwei Punkten mit den magnetischen Potentialen V und V' dargestellt ist durch die Gleichung $R = \varrho\,(V - V')$, wo ϱ die Verdetsche Konstante ist und R die Drehung bedeutet. Cornu versuchte,

die magnetische Drehung unter den gleichen Gesichtspunkten zu behandeln wie beim Quarz und die Wellenoberfläche zu bestimmen (C. R. 92, p. 1369, 1881; 99, p. 1045, 1884). Die weiteren Versuche gehören in die elektromagnetische Lichttheorie. Hier nur noch einige tatsächliche Angaben.

Daß auch die Wärmestrahlen eine solche magnetische Drehung erfahren, ist zuerst von Wartmann (Journ. l'Inst. 1846, 6/5.) beobachtet, ist dann ausführlich nachgewiesen durch De la Provostaye et Desains (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 27, p. 232, 1849). Daß das Verdetsche Gesetz nur eine erste Annäherung ist, zeigte schon G. Wiedemann (1826—1899) beim Schwefelkohlenstoff. Maxwell (l. c.) ersetzte es durch die Formel $\varrho = A \frac{n^2}{\lambda^2}\left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}\right)$, wo n der Brechungsindex ist, welche für Schwefelkohlenstoff gut stimmt, aber für Kreosot völlig versagt. Auch die Untersuchungen E. Becquerels (C. R. 85, p. 1227, 1877) haben keinen Fortschritt gebracht zu einer allgemeingültigen Relation. — Daß auch Gase die Drehung der Polarisationsebene im Magnetfelde zeigen, haben Kundt und Röntgen 1878 zuerst am Schwefelkohlenstoff Dampf nachgewiesen (Wied. Ann. 6, p. 332, 1879). Messende Versuche gelangen ihnen erst mit großer Apparatur, wo störende Einflüsse sorgfältig vermieden und die Möglichkeit, hohe Druckkräfte anzuwenden, gegeben waren. So fanden sie Sauerstoff, Wasserstoff, Sumpfgas, Kohlenoxyd und Luft positiv drehend; die Stärke wuchs mit der Intensität des Feldes und der Dichte des Gases für die Substanzen in verschiedenem Maße (Wied. Ann. 8, p. 278, 1879). Die späteren Versuche Becquerels (Journ. d. Phys. 8, p. 198, und 9, p. 265, 1879/80) brachten ebenfalls kein allgemeines Gesetz.

Der Einfluß der Temperatur wurde von De la Rive zuerst beobachtet, und zwar meist so, daß eine Temperaturerhöhung eine Verminderung der Drehung bedingte; aber es zeigte sich auch das Gegenteil (Ann. de Chim. et de Phys. 22, p. 24, 1871). Joubert arbeitete mit einem Stück Flintglas und fand bei Temperaturerhöhung von 10 auf 500° eine geringe Vermehrung der Drehung von 3° 37′ auf 3° 69′ (C. R. 87, p. 984, 1878); Bichat (1845—1905) dagegen fand bei Schwefelkohlenstoff eine Verminderung (Journ. d. Phys. 8, p. 204, 1879) bei Temperaturerhöhung.

Im Jahre 1875 machte Kerr (1827—1907) die Entdeckung, daß dielektrische Körper oder auch schlecht leitende Substanzen in einem starken elektrischen Felde die Eigenschaft der Doppelbrechung bekamen, welche nach Aufhören des elektrischen Feldes wieder voll-

ständig verschwand, und wies das an einer großen Zahl von Körpern nach (Phil. Mag., Ser. 5, 1, p. 337 u. 416, 1875; ib. 8, p. 85 u. 229, 1879; ib. 13, p. 153 u. 248, 1882), und zwar verhalten sie sich wie optisch einachsige Kristalle, deren Achse parallel den Kraftlinien ist. Die Doppelbrechung ist proportional dem Quadrat der Intensität des elektrischen Feldes.

Ein Jahr später fand Kerr die Eigenschaft des reflektierten Lichtes, welche als Kerreffekt bezeichnet wird, daß linear polarisiertes Licht bei Reflexion an einem spiegelnden Magnetpol eine Drehung der Polarisationsebene erleidet (ib. 3, p. 321, 1877, und 5, p. 161, 1878). Fitzgerald (1851—1901) versuchte eine Theorie dazu nach Art der magnetischen Drehung der Polarisation zu geben, doch erscheint die Analyse nicht vollständig (Proc. R. S. 25, p. 447, 1877). Das veranlaßte Kundt, diese Erscheinung, die von Hall (Phil. Mag. 12, p. 171, 1884) auf Nickel und Kobalt ausgedehnt war, genauer zu studieren. Er stellte sich dünne, durchsichtige Schichten von Eisen, Nickel und Kobalt her und beobachtete die Drehung der Polarisationsebene beim Durchgang des Lichtes durch diese Schichten im magnetsichen Felde. Es ergab sich, daß alle drei Schichten starke Drehung zeigten, Eisen am meisten, etwa 30000mal größer als Glas von gleicher Dicke. Bei allen dreien ist die Drehung im Sinne des magnetisierenden Stromes (Wied. Ann. 23, p. 228, 1884). Die Kundtschen Resultate zeigen, daß die Fitzgeraldsche Theorie nicht richtig ist, daß man sich aber den Kerreffekt wohl erklären kann, wenn man annimmt, daß das Licht bei der Reflexion etwas in die reflektierende Substanz eindringt und daß in dieser dünnen Schicht des Metalls negative Drehung stattfindet. Zur Erklärung der Kundtschen Versuche dehnte Voigt seine Lichttheorie auf die elektromagnetische Drehung der Polarisationsebene aus und zeigte, daß die theoretischen Ergebnisse mit den experimentellen Resultaten gut übereinstimmen (ib., 23, p. 493, 1884). Die Lichttheorie Voigts ist entwickelt in ib. 19, p. 873, 1883; 23, p. 194, 1885.

Daß auch die Kristalle im magnetischen Felde eine Veränderung ihrer Polarisation erfahren, hat Chauvin am Doppelspat gezeigt. Er ließ durch eine senkrecht zur Achse geschnittene Platte in deren Hauptschnitt linear polarisiertes gelbes Licht gehen und fand, wenn ein magnetisches Feld erzeugt wurde, daß der Strahl dann elliptisch polarisiert austrat und die große Achse macht einen Winkel mit der ursprünglichen Schwingung (Journ. d. Phys. 9, p. 5, 1890). Wedding hatte schon an Glasplatten gezeigt, wie man die durch

Druck oder Zug entstehende Doppeldrehung von der magnetischen Drehung im magnetischen Felde trennen kann und wie die beiden Momente sich superponieren (Wied. Ann. 35, p. 25, 1888).

Farben.

Oben ist die Aristotelische Farbentheorie aus Weiß und Schwarz erwähnt. Erst viele Jahrhunderte später bahnen sich langsam andere Anschauungen an, die meist an die Erscheinung des Regenbogens anknüpfen. Wohl der erste, der hier auf dem Wege der Erkenntnis etwas weiter gekommen ist, war Roger Bacon (1214 bis 1294), der in seinem Opus majus (gedruckt London 1733), p. 357 ff., sich auch mit dem Regenbogen beschäftigt. Er erklärt denselben als ein Produkt der Lichtbrechung in den Wassertropfen, hat auch die Höhe mit 42° nahezu richtig beobachtet, aber die Farben erklärte er als subjektive Empfindungen, veranlaßt durch die verschiedenen Flüssigkeiten des Auges. Theoderich (Theodoricus de Saxonia) hat 1311 ein Buch De radialibus impressionibus geschrieben, das von Venturi 1814 gefunden und bekannt gemacht ist; darin wird der Regenbogen richtig durch doppelte Brechung und Reflexion und der Nebenregenbogen durch doppelte Brechung und doppelte Reflexion im Inneren der Tropfen erklärt; aber über die Entstehung der Farben weiß er nichts zu sagen. Die gleiche Erklärung gibt Maurolycus (1498—1577) in seinem Photismi de lumine et umbra, 1575. Er zählt die sieben Regenbogenfarben auf, ohne sie zu erklären, aber vergleicht sie mit den Farben eines Prismas. Joh. Kepler (Ad Vitellionem paralipomena, 1604, und Dioptrice, 1611) erklärt die Farben Buch 1 durch verschiedene Grade der Durchsichtigkeit und Dichte der Medien, also als eine Absorptionserscheinung, wohl noch durch Aristoteles beeinflußt. Die gleiche Ansicht findet sich bei M. Ant. de Dominis († 1624) in De radiis visus et lucis, 1611, c. III. Er hat zuerst experimentiert mit Glaskugeln, die mit Wasser gefüllt waren; daran zeigt er die Reflexion an der Rückseite und erklärt die Farben durch die verschieden langen Wege in dem Wassertropfen; der rote Strahl hat den kürzesten Weg, der violette entsteht durch die stärkere Absorption auf dem längeren Wege.

Descartes (1596—1650) war wohl nach Maurolycus der erste, welcher die Gleichheit der Regenbogenfarben mit den durch ein Prisma erzeugten ausdrücklich betont. Er arbeitete mit einem rechtwinkligen Prisma und ließ das Licht auf die Hypotenusenfläche

fallen (Discours de la méth. etc., 1637, p. 250ff.). So anerkennenswert auch die richtige geometrische Erklärung der Winkel des Regenbogens 42° und 52° ist, so ist seine Farbenerklärung doch auffallend: Das Licht besteht aus kleinen unelastischen Kugeln, welche eine geradlinige Fortpflanzungsgeschwindigkeit u und eine rotierende Geschwindigkeit w haben. Ist $w > u$, so ist das Licht rot, $w = u$, so ist es grün; $w < u$ violett; aber die Farbe entsteht erst im Auge, da die ersteren mit größerer Wucht auf die Retina fallen, als die letzteren; denn u ist für alle gleich groß. Er faßt den Vorgang also energetisch auf und ist wohl der erste, welcher die drei Grundfarben annimmt (Abhandlung über Meteore).

Joh. Marcus Marci (1595—1667) beobachtet das durch ein Prisma (trigonum) vor dem Loche in einem dunklen Zimmer erzeugte Spektrum (iris trigonia). Die farbigen Strahlen divergieren beim Austritt aus dem Prisma stärker (p. 21), haben also verschiedene Brechbarkeit. Das einmal farbig gewordene Licht verändert bei weiterer Brechung seine Farbe nicht mehr (Thaumantias etc. 1648, p. 95). Das ist also das „experimentum crucis" Newtons, und zwar ganz auf die gleiche Art gemacht, indem in dem Schirm, worauf das Spektrum aufgefangen war, ein kleines Loch gemacht war. — Grimaldi (1618—1663) lehrt: Die Verschiedenheit der Farben ist durch eine Verschiedenheit der Art und der Geschwindigkeit der Bewegung bedingt. Die Bewegung ist eine Undulation. Die Farben sind also das Licht selbst (non sunt aliquid extra lucem, seu realiter distinctum a luminis extitate (sic!); Physico-mathesis de lumine etc., 1665, Prop. 29). Grimaldi hat auch das Beugungsspektrum durch eine fein geritzte Metallplatte erzeugt und untersucht und mit dem Prismaspektrum verglichen. Die Farben der Körper werden durch das innere Gefüge der Körper, die Größe der Poren, bedingt, da dadurch Verschiedenheit für die Reflexion entsteht. — Nur von den Farben der Körper handelt R. Boyle (1627—1691). Weiße Körper strahlen alles Licht gleichmäßig zurück, schwarze gar nichts; ist die Reflexion ungleichförmig, so entstehen Farben (Experimenta et considerationes de coloribus, 1663). Aber er macht hier auch die erste Beobachtung der farbigen Ringe, wenn eine schwach gekrümmte Linse auf einer ebenen Glasplatte liegt, und ebenso die farbigen Streifen bei dünnen Luftschichten zwischen zwei Platten (Works, p. 742). — R. Hooke (1635—1703) beobachtete das weiße Licht als die einfachste Schwingungsart senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung des Lichtstrahls; wird diese Schwingung gestört durch schiefen Anprall gegen eine Grenzfläche, so entsteht

Verwirrung (disturbance) und dadurch Farbe, wenn solche ins Auge dringen, und zwar blau, wenn ein schwacher Stoß (pulse) vorangeht und der stärkere folgt, rot umgekehrt (Works, p. 82, in der R. S. 15. 2. 1671 vorgetragen).

Diese Arbeit hatte wohl das Gute, daß sie Newton veranlaßte, seine Theorie nun zu veröffentlichen, an welcher er seit 1666 gearbeitet hatte. Er sandte sie mit einem Briefe vom 18. 9. 1672 an Oldenberg unter dem Titel A new theory about light and colours (Phil. Trans. 1632, 6. Febr.). Schon hier gibt Newton den Beweis dafür, daß das weiße Licht aus dem farbigen zusammengesetzt ist. Die ganze Theorie ist in Optice or a treatise of the reflexions, inflexion and colours of light, 1704, erschienen. Seine Vorlesungen über Optik aus den Jahren 1669—1671 in Cambridge, veröffentlicht 1728, geben keine Erweiterung.

Besonders in der ersten Zeit fehlt es bei Newton nicht an Äußerungen, welche die verschiedenen Farben mit verschiedenen Wellenlängen zu erklären scheinen, z. B. Phil. Trans. 7, p. 5088, 1672: „If by any means those (aether-vibrations) of unequal bignesses be separated from one another, the largest beget a Sensation of a Red colour, the least or shortest of a deep Violet etc.“ Aber er verläßt diese Ansicht mehr und mehr in der Optice. Im 1. Buche zeigt er durch zahlreiche Experimente die Homogenität der einzelnen Farben des Spektrums und bestimmt die Brechungsindizes der einzelnen Farben. Er vereinigt die Spektralfarben auf verschiedene Weise zu Weiß. Dabei führt er bei dem Experiment mit dem Kamme, welcher in dem Gang der Spektralfarben schnell hin und her bewegt wird, die Empfindung „weiß“ im Auge richtig auf die Dauer des Lichteindrucks im Auge zurück. Er erklärt den Regenbogen und Nebenregenbogen richtig mit den richtigen Randwinkeln für den Hauptbogen mit 40^0 30′ bis 42^0 30′, für den Nebenbogen rot 50, violett 53^0 30′. Die sekundären Nebenbogen kann er nicht erklären; das tat erst Young (Gilb. Ann. 39, p. 272, 1811) durch Interferenz, vollständige Erklärung erst durch Clausius (Grunerts Beitr. z. meteor. Optik, Heft 4, 1850). Endlich behandelt Newton im 1. Buche die chromatische Abweichung bei Linsen, Fernrohren und Mikroskopen richtig. Im 2. Buche behandelt Newton die Farbenringe sowohl im reflektierten wie durchgehenden Lichte, ebenso die Boyleschen Seifenblasen und die Hookeschen Glimmerblättchen, sowohl im weißen Lichte wie im monochromatischen. Zur Erklärung führt er die Anwandlungen für jeden Lichtstrahl, an der Grenze eines Mediums durchgelassen oder reflektiert zu

werden (Fits of easy Transmission or of easy Reflexion), ein. Diese Anwandlungen werden nicht durch das Medium erzwungen (Biot, 1829), sondern sind Dispositionen der Lichtteilchen, die periodisch sind, und zwar sind die Intervalle für Rot am größten, für Violett am kleinsten und verschieden durch das Verhältnis zu den Molekülen der Medien. Auch die bei den Beugungserscheinungen auftretenden Farben erklärt Newton durch diese Fits. Er glaubte, durch seine Spektraluntersuchungen über den Bereich der einzelnen Farben zu einer Analogie mit den Tönen einer Oktave gekommen zu sein und hat dieser Spekulation einen breiten Raum gestattet, dieselbe auch verfolgt auf dem Gebiete der Körperfarben und Mischfarben. Auch die genannten Körperfarben sind durch Fits entstanden, indem einige Teilchen des Lichtes in den Körper einzudringen Neigung haben, so daß nur die anderen reflektiert werden. Daher erklärt er auch die Mischfarben nicht richtig; daß aus Gelb und Blau das Grün bei körperlichen Farben entsteht, überträgt Newton auch auf die Spektralfarben, obwohl ihm ein Experiment gezeigt hätte, daß die auf Absorption beruhenden Farben sich anders als die Spektralfarben verhalten. Obwohl also sein stolzes Wort: Hypotheses non fingo, in bezug auf diese optischen Leistungen nicht angewendet werden kann, sind seine Verdienste um die Farbenlehre wegen der zahlreichen Experimente, welche nahezu erschöpfend sind in bezug auf die Zusammensetzung des weißen Lichtes, ganz außerordentlich und seine experimentell abgeleiteten Resultate haben sich bewährt.

Ein großer Fortschritt wird durch L. Euler geboten in seiner Nova theoria lucis et colorum (Op. var. arg. I, p. 169, 1746). Im 3. Kapitel behandelt er die Zusammensetzung des weißen Lichtes aus den „einfachen" Strahlen, welche bestimmte Wellenlänge haben. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für diese verschiedenen Wellen nach allen Seiten die gleiche ist, kommen sie gleichzeitig von einem leuchtenden Punkte zu einem anderen desselben Mediums und bilden in ihrer Gesamtheit das weiße Licht. Die roten Strahlen haben die größte Wellenlänge, die violetten die kleinste (Mém. Berlin 1752, p. 262). Besonders interessiert ihn die Beseitigung der chromatischen Abweichung, von der Newton (Opt. I, p. 68) erklärt hatte, daß sie überhaupt nicht beseitigt werden könne. Euler gibt mehrere Kombinationen an, welche Achromasie geben sollen (Mém. Berlin 3, p. 274, 1747), und Dollond (1706—1761, Phil. Trans. 1753, I, p. 292) stellte daraufhin das erste achromatische Objektiv her. Nun war die Dispersion von größtem Interesse, darum bemühte

sich Euler, eine allgemeine Dispersionsformel zu finden (Op. var. arg. II, p. 1, 1750). Nach Methode und Resultat ist die Rudbergsche Dispersionsformel damit gleich (Pogg. Ann. 9, p. 483, 1827; s. unten).

Im Jahre 1802 behauptete Wollaston, beim Betrachten eines vom Sonnenlicht erleuchteten Spaltes in einem dunklen Zimmer nur die vier Farben Rot, Grün, Blau und Violett gesehen zu haben (Phil. Trans. 1802, p. 365). Young nahm diese Idee sofort auf und fand, daß er mit drei Grundfarben Rot, Grün, Violett, auskommen könne, um alle Farben zu erzeugen. Dementsprechend soll das Auge in der Retina drei für diese Farben empfängliche Nervenenden haben. Er stellt auch die Farbenmischung mit einem Dreieck dar, in dessen Ecken diese drei Grundfarben stehen und sich über die Fläche mit abnehmender Intensität ausbreiten. In der Mitte entsteht dann Weiß und für jeden Punkt der Fläche ergibt sich die Farbe als Mischfarbe aus den dreien (Lectures an Nat. Phil. 1807, p. 37). Young stellte damit die Spektralfarben in Parallele mit den Pigmentfarben. Für letztere hatte Leonardo da Vinci schon die Herstellung von Mischfarben aus einfachen gelehrt (Trattato della pittura, 1651).

Der erste, welcher aus drei Farben alle Farbennuancen ableiten wollte, war wohl Le Blond, der den Dreifarbendruck erfand (Harmony of colouring, 1737). P. Castel nahm die drei Grundfarben: Feuerrot, Gelb und Himmelblau (L'optique des couleurs, 1740). Bei Zahn (Oculus artificialis dioptricus, 2. Aufl. 1702, p. 111) tritt zum ersten Male die Idee des Farbendreiecks auf. 1750 legte Tob. Mayer der Soc. Gotting. seine Arbeit De affinitate colorum vor, wo er aus Rot, Gelb, Blau 91 Mischfarben herstellte (Oper. inedita I, 1775). In den Anmerkungen hierzu gibt Lichtenberg Farbendrucke mit Zinnober, Gummigutt und Berlinerblau. Lambert (1728—1777) stellte, angeregt durch Mayer, seine Farbenpyramide her, wobei auch die Intensität der einzelnen Grundfarben berücksichtigt war (Beschreibung einer ... Farbenpyramide usw., 1772). Besonders eingehend beschäftigte sich Wünsch mit den Mischfarben und stellte sie her aus Rot, Grün und Violett der Spektralfarben, aus deren Kombination er Weiß und alle anderen Farben erzeugt. Auch untersucht er die Wirkung auf gefärbte Lösungen, z. B. des nephritischen Holzes (= Fuchsin; Versuche u. Beob. über die Farben des Lichtes, 1792).

Brewster ging von den Komplementärfarben aus, die schon von Newton (l. c.) zum Teil festgestellt waren. Er nahm an, daß

es in Wirklichkeit nur drei Lichtarten gebe: Rot, Gelb und Blau, die sich mit verschiedener Intensität über das ganze Spektrum ausdehnten und durch die verschiedene Intensität bei ihrem Zusammenfallen die Farben erzeugten (Edinb. Trans. 12, p. 123, 1834).

Maxwell nahm den Gedanken, daß jede Farbe als eine Funktion von drei Grundfarben linear darstellbar ist, auf, um nun durch entsprechende Intensitätsfaktoren das Problem durch eine einfache Gleichung zu lösen und Tabellen herzustellen, die für alle Wellenlängen die entsprechende Farbe angeben (Phil. Trans. 1860, p. 57). Durch Lord Rayleigh wurde die Darstellung für ein prismatisches Spektrum wesentlich vervollständigt (ib. 1886, p. 157). Daß die Brewstersche Theorie unhaltbar ist, hat Helmholtz gezeigt (Pogg. Ann. 86, p. 501, 1852). Die Newtonsche Farbenmischung veranlaßte Graßmann (1809—1877), die Mischfarben nach Analogie einer Schwerpunktsberechnung aus den einfachen Farbentönen abzuleiten (ib. 89, p. 69, 1853).

Die Youngsche Theorie wurde von Helmholtz seiner Theorie der Farbenempfindungen zugrunde gelegt. Ich verweise ohne eine Inhaltsangabe auf das klassische Werk: Handbuch der physiologischen Optik, 2. Aufl. 1896, p. 311ff., weil der hier sehr wesentliche Teil der physiologischen Bedingungen für die Geschichte der Physik etwas abseits liegt. Es ist in dem 2. Bande auch eine vollständige Literaturangabe geboten. Aus anderen Gründen gehe ich auch nicht auf Goethes Farbenlehre ein; sie hat mit Physik gar nichts zu tun.

Der Helmholtzschen Theorie trat in sechs Mitteilungen Hering (1834—1918) entgegen, zusammengefaßt in: Zur Lehre vom Lichtsinn (Wien 1878), die ausgeht von einem Gedanken Plateaus (Bull. Brüssel 1835, p. 52 u. 89) über den Dissimilations- und Assimilationsprozeß, der in der Lichtempfindung eine Rolle spielt. Auch Hering hat drei farbenempfindende Substanzen, die erste empfinde schwarz—weiß, die zweite blau—gelb, die dritte rot—grün. Eine gute Vergleichung beider Theorien gibt Weinhold (1841—1917, Wied. Ann. 2, p. 631, 1877). Wesentlich für diese Untersuchungen ist die Tatsache der Farbenblindheit, die wohl zuerst wissenschaftlich festgestellt ist von Dalton (Mem. Manchester V, 1, 1794), dann ausführlicher untersucht ist von A. Seebeck (Pogg. Ann. 42, p. 178, 1837). Frühere Erwähnungen von Farbenblindheit sind von Tuberville, Phil. Trans. 1684, p. 736; Huddart, Phil. Trans. 1777, p. 14; v. Gentilly, Lichtenbergs Mag. 1, p. 57, 1785. Später wird die Farbenblindheit oft als Daltonismus bezeichnet (L. Häsers Reper-

torium IV, p. 125, 1839). Die weiteren Untersuchungen gehören in das Gebiet der Physiologie.

Der Unterschied der homogenen Spektralfarben und der Pigmentfarben bei Mischfarben ist durch die Untersuchung von Albert (Wied. Ann. 16, p. 129, 1882) sichergestellt. Eine Erweiterung der Helmholtzschen Theorie bietet von Bezold (Wied. Ann. 26, p. 390, 1885), indem er annimmt, daß auf der Netzhaut drei Substanzen vorhanden sind, die durch die entsprechenden Lichtstrahlen zersetzt werden, um das „Abklingen“ und die Nachbilder verständlich zu machen.

Dispersion.

Oben ist erwähnt, daß Eulers Formel die Dispersion mit dem Brechungsindex verbunden habe, indem $m_r = a^{1+x}$; $m_v = a^{1+y}$, wo m_r und m_v die Brechungsindizes für Rot und Violett, x und y die Schwingungszahlen sind und a das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des mittleren Strahls in den beiden Medien ist, und daß die Rudbergsche Formel (Pogg. Ann. 9, p. 483, 1827) wesentlich auf das gleiche hinauskomme. Das ist um so auffälliger, als Euler selbst diese Theorie verlassen hat. Nachdem Dollond 1758 auf Grund der Eulerschen Anregung ein wirklich achromatisches Objektiv hergestellt hatte und Beguelin (1714—1789) nachgewiesen hatte, daß hier wirklich durch ungleiche Zerstreuung im Crown- und Flintglas die Achromasie erreicht sei (Mém. Berlin 1762, p. 74), nachdem endlich Zeiher durch reichlichen Zusatz von Blei ein Glas hergestellt hatte, dessen Zerstreuung noch erheblich größer war als das Dollondsche Flintglas, ohne daß die mittlere Brechung über 1,61 hinauswuchs, gab Euler seine Theorie auf (Mém. Berlin 1763 p. 119, und ib. 1776, p. 150) und berechnete nun in seiner Dioptrik zahlreiche achromatische Kombinationen (Dioptr. 1769—1771). Auch Klingenstierna (1698—1765) bestritt Newtons Behauptung, daß Achromatismus unmöglich sei und berechnete solche Objektive (Abh. Schwed. Akad. 22, p. 75).

Eine wesentliche Förderung erfuhr die Dispersionstheorie durch die Entdeckung der Fraunhoferschen Linien, welche es ermöglichten, bestimmte Strahlen des Spektrums auf ihre Brechbarkeit zu untersuchen. Diese Linien wurden von Wollaston zuerst gesehen als er einen durch Sonnenlicht intensiv erleuchteten Spalt in einem dunklen Zimmer direkt durch ein Prisma betrachtete (Phil. Trans. 1802, p. 365). Er wußte nichts damit anzufangen. Fraunhofer (1787—1826) suchte nach achromatischen Linsen und mußte die Dispersion daher

messen. Er versuchte, Prismenkombinationen achromatisch zu machen; um genau zu beobachten, sah er durch ein Theodolithenfernrohr; aber die Unbestimmtheit der Strahlen ließ keine feste Messung zu. Er wählte als Lichtspender nun eine Kerze oder Öllampe und fand in dem Spektrum eine helle gelbliche Linie. Nun suchte er nach einer gleichen Linie im Sonnenspektrum, wobei der Spalt 24 Fuß vom Flintglasprisma entfernt war und Minimumstellung des Prismas gewählt war. Jetzt sah er statt des gesuchten hellen Streifens eine große Anzahl schwarzer Linien, die er mit Buchstaben A, B bis Z, a, b usw. bezeichnete (Gilb. Ann. 56, p. 264, 1817). Damit hatte Fraunhofer ein sicheres Mittel, die Brechungsindizes für diese Linien, deren relative Lage im Spektrum sich als konstant erwies, in den verschiedenen Medien zu messen (ib. 74, p. 377, 1823). Er erkannte, daß die in dem Lampenlicht gesehene gelbe Linie genau mit der D-Linie zusammenfiel. Er zeigte, daß das Spektrum der Venus die gleichen Linien habe wie das Sonnenspektrum.

Brewster zeigte, daß die meisten Körper mit unvollkommener Verbrennung die gelbe Linie zeigen und daß mit Wasser verdünnter Alkohol mit einer homogenen Flamme brenne und nur die gelbe Linie zeige (Pogg. Ann. 2, p. 101, 1826). Talbot führte Metallsalze in die Alkoholflamme und fand die charakteristischen gefärbten Linien (Schweigg. Journ. 18, p. 445, 1817).

Durch Fraunhofer und Brewster (Gilb. Ann. 50, p. 129 und 301, 1815) waren zuerst die Dispersionsvermögen einiger Substanzen festgestellt (cf. Steinheil in Abh. München V, 2). Nach der Fraunhoferschen Methode haben dann viele Forscher gearbeitet. Freilich hinderte zunächst die Apparatur den Fortschritt. Das erste kompendiöse Spektrometer wurde von Meyerstein gebaut (Pogg. Ann. 98, p. 91, 1856). Man kann sich heute kaum vorstellen, daß damals noch eine Empfehlung W. Webers nötig war, den Artikel zu lancieren. Dies erste war so gebaut, daß die Achse des Beobachtungsfernrohrs senkrecht auf der Ausgangsebene des Prismas stand; aber es hatte bereits den verstellbaren Spalt im Brennpunkt der Kollimatorlinse. Dann mußte der brechende Winkel kleiner als 39^0 sein und der Brechungsquotient war $n = \sin(\eta + \varphi) : \sin \varphi$. Diese Unbequemlichkeit und einige andere beseitigte Meyerstein erst in dem Apparat von 1861 (ib. 114, p. 140), wo er die Minimumstellung und die Skala zum Messen der Linien einführt. Diesem Typus sind die späteren Spektrometer mehr oder weniger gefolgt. Die Einführung des Schwefelkohlenstoffprismas ist wohl zuerst von

Rutherfurd in seinem Spektroskop angewendet (Sill. Amer. J. 39, März 1865).

Von großer Bedeutung war die Einführung des Prisma à vision directe durch Amici (1786—1863; 1860). Freilich hatte schon Dollond (l. c.) Prismen hergestellt, bei welchen die Dispersion beseitigt war und nur Ablenkung blieb, und ebenfalls Kombination aus zwei Prismen, wo minimale Ablenkung aber Dispersion erhalten wurde. Aber diese Versuche sind weder zu festen Apparaten ausgebildet, noch haben sie in den 100 Jahren bis Amici eine experimentelle Bedeutung erlangt. Daß diese Amicischen Prismen, die schließlich aus zwei rechtwinkligen Flintglasprismen, einem rechtwinkligen und zwei gleichseitigen Crownglasprismen zusammengesetzt waren, so große Bedeutung erlangten, verdanken sie der Astronomie. Doppler (1803—1853) hatte sein bekanntes Prinzip über die erhöhte Frequenz einer Wellenbewegung bei Verringerung des Abstandes und umgekehrt durch Schallwellen vielfach bestätigt gefunden (Abh. böhm. Ges. 2, p. 465, 1841/42). Er selbst hatte darauf aufmerksam gemacht, daß durch die Farbe der Doppelsterne es mit diesem Prinzip möglich sei, deren Geschwindigkeit zu bestimmen (Pogg. Ann. 68, p. 1, 1847). Allein es war keinem gelungen, dies nun auszuführen, so daß Maxwell darauf verzichtete (Phil. Mag. 1868, p. 532). In demselben Jahre hatte Hyggins mit Anwendung von zwei Amicischen und drei einfachen Prismen eine so starke Dispersion erhalten, daß er die Verschiebung der Fraunhoferschen Linien glaubte messen zu können, allein vergeblich (ib., p. 535).

Da kam Friedrich Zöllner (1834—1882) auf den genialen Gedanken, zwei Amicis in entgegengesetzter Richtung nebeneinander zu legen, so zwei entgegengesetzte Spektren zu erzeugen, die durch eine halbierte Objektivlinse im Beobachtungsrohr das Licht bekamen; die beiden Hälften der Linsen waren verschiebbar und nun konnte man mit der Mikrometerschraube die entsprechenden Linien zur Deckung bringen, so daß die geringste Verschiebung meßbar wurde (Pogg. Ann. 138, p. 32, 1869, aus Abh. Leipz.). Daher nannte er den Apparat Reversionsspektroskop. In demselben Jahre zeigte Zöllner auch, wie man mit seinem Apparat die Protuberanzen beobachten kann. Neben den Zöllnerschen Apparaten sind von großer Bedeutung die Janssenschen Konstruktionen. Das älteste Amicische Prisma hatte ein Flint- und zwei Crownglasprismen. Janssen stellte das Geradsichtprisma aus fünf Einzelprismen zusammen (C. R. 54, p. 1280, 1862). Besonders interessant ist seine Methode, durch Drehung eines solchen Prismas um die Längsachse

statt eines schmalen Streifens eine Fläche beobachten zu können. Neben der Kirchhoffschen Entdeckung (s. unten) ist dieses Dopplersche Prinzip wohl die für die Astrophysik wesentlichste Erkenntnisquelle geworden; doch die Weiterentwicklung gehört nicht hierher.

Für die zweite Hälfte des vorigen Jahrhunderts ist die Frage nach der Dispersion von großer Bedeutung gewesen. Obwohl durch die Dollondschen Entdeckungen festgestellt war, daß ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Dispersion und Brechung nicht bestehe, sondern für jeden einzelnen Körper die beiden Größen besonders bestimmt werden mußten, versuchte man ein Gesetz zu finden, welches gestattete, Brechungskoeffizient und Wellenlänge in eine Beziehung zu setzen. Der erste Versuch war der Cauchys (Mém. sur la dispersion, 1836), wonach der Brechungskoeffizient durch eine Reihe nach fallenden geraden Potenzen der Wellenlänge ausgedrückt wird, wobei dann im einzelnen die Frage ensteht, wieviel Glieder der Reihe benutzt werden müssen, um Übereinstimmung zwischen Formel und Beobachtung zu erhalten. Christoffel (1829—1900) zeigt die Bedenken gegen Cauchys Formel auf und kommt zu einer sehr viel komplizierteren Abhängigkeit (Pogg. Ann. 117, p. 27, 1862). Demgegenüber nimmt Briot (1817—1882) an, daß in den durchsichtigen Medien die Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch die Körpermoleküle geändert wird, so daß die Dichtigkeit des Äthers in dem Körper eine periodische Ungleichheit bekommt. Das Resultat ist eine Gleichung, welche der Cauchyschen analog ist (Essais sur la théorie math. de la lum., 1863; vgl. auch O. E. Meyer, Pogg. Ann. 145, p. 80, 1872). Nun setzt die ausgedehnte Untersuchung Kettelers (1836—1900) ein, der alle drei Theorien als unzulänglich nachweist (Pogg. Ann. 140, p. 1 u. 177, 1870; J. p. 166, 1874). Inzwischen war nun die anomale Dispersion entdeckt durch Leroux (C. R. 55, p. 126, 1862), der fand, daß in einem Prisma mit Joddampf die roten Strahlen mehr abgelenkt waren als die violetten. Dann fand Quincke (Pogg. Ann. 119, p. 599, 1863), daß der Brechungskoeffizient bei Metallen vom Einfallswinkel abhängig sei; Christiansen entdeckte die anormale Dispersion beim Fuchsin (ib. 141, p. 479, 1870), Kundt dehnte die Untersuchung auf eine größere Reihe absorbierender Medien aus (ib. 142, p. 163, 1871 bis J. p. 615, 1874) und kommt zu dem Resultat, daß alle Körper, welche starke Absorption und Oberflächenfarben besitzen und die in Kristallform dichroitisch sind, anormale Dispersion zeigen. Dadurch war die Bedeutung

der Dispersionsformeln wesentlich herabgesetzt, da dieselben nur anwendbar blieben für farblos durchsichtige Medien, während die übrigen Körper spezielle Untersuchungen erforderten. Einen Überblick über die bis dahin vorliegenden Ergebnisse bietet Vogel (Praktische Spektralanalyse, 1877). Die weiteren Versuche mußten sich auch mit der anomalen Dispersion befassen. Dem suchten die Arbeiten von Boussinesq (Liouv. Journ. 13, p. 313, 1861), Sellmeyer (Pogg. Ann. 143, p. 272, 1871; 145, p. 399; 157, p. 386 u. 525, 1876), Helmholtz (ib. 154, p. 582, 1875) zu genügen. Die Sellmeyerschen Formeln verlieren ihre Gültigkeit, sobald die Schwingungsdauer des Äthers gleich der der Körpermoleküle wird. Die Sellmeyersche Theorie geht von der Annahme aus, daß die Moleküle der Körper durch die Ätherschwingungen in Schwingungen versetzt werden und dadurch eine Wechselwirkung entsteht, die schließlich zu der Gleichung $n^2 = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$ führt. Helmholtz will die Absorption durch eine Reibung erklären, welche die lebendige Kraft der Wellenbewegung in Wärme verwandelt. Daraufhin stellte Lommel (1837—1899) eine neue Dispersionstheorie auf (Wied. Ann. 3, p. 113, 251, 339, 1878), die an die Fluoreszenz anknüpft.

Fluoreszenz.

Sie ist zuerst von Kircher (1601—1680) beobachtet an einer Lösung (Tinktur) des von den Bewohnern Mexikos Tlapazalli genannten Holzes (lignum nephriticum), welche durchscheinend weiß, im reflektierten Lichte blau erschien. Natürlich „sah" Kircher auch noch viele andere Wunderdinge daran, aber sein Versprechen, die Erklärung zu liefern, hat er nicht gehalten (Ars magna lucis et umbrae, 1671, p. 56). Boyle nahm diese Entdeckung auf, stellte fest, daß sie durchscheinend goldgelb, reflektierend blau aussehe. Er vergleicht diese Erscheinung mit der von Harriot wohl zuerst gemachten Bemerkung, daß Goldschlägerhaut durchsichtig sei, aber dann grünblau erscheine (Epist. ad Kepler, 235, 1607), und erklärt die Sache dadurch, daß diese Körper die Eigenschaft hätten, einzelne Lichtarten zurückzuwerfen, andere durchzulassen; das war auch Newtons Theorie (Exper. et cons. de col. III, Nr. 9 u. 10, 1663).

Mehr als 100 Jahre vergehen, ehe wieder die Rede von solchen Beobachtungen ist. Wünsch stellte die Erscheinung an derselben Tinktur wieder fest, nur nennt er die Farben blau und rot; bei Safran will er rot und grün, bzw. gelb gesehen haben. Er füllte ein Prisma mit Indigo, dann wurde rot absorbiert, das reflektierte

Licht erschien blau-weiß (Vers. u. Beob. über die Farben, 1792). Wieder 50 Jahre später zeigte Brewster die Erscheinung an schwefelsaurem Chinin, indem er in einen damit gefüllten Glastrog durch eine Linse einen Kegel von Sonnenlicht warf; dieser Kegel leuchtete himmelblau, während das durchgelassene Licht weiß erschien. Chlorophyll, welches schon von Wünsch untersucht war, gab blutroten Kegel, durchscheinend braunrot; Kurkumatinktur liefert grünen Kegel, durchscheinend gelbbraun; Flußspat: Kegel violettblau, durchscheinend weiß. Er nannte den Vorgang „innere Reflexion“ (Rep. of Brit. Assoc. 1838, p. 10, und Edinb. Trans. 12, p. 542, 1846). J. Herschel nannte die Erscheinung „epipolische Dispersion“ (Phil. Trans. 1845, p. 143).

In einer sehr ausführlichen Arbeit, die vom Flußspat ausging, untersuchte Stokes (1819—1903) die Verhältnisse besonders an Chininlösung und nannte diese Eigenschaft Fluoreszenz (Phil. Trans. 1852, p. 463). Er beobachtete auch zuerst den Unterschied, ob man das reflektierte Licht durch einen Körper beobachtet, oder ob man das Licht vor der Reflexion durch den Körper hindurchgehen läßt. Dann untersuchte er die Fluoreszenz mit den Spektralfarben und fand, daß die Strahlen größter Brechbarkeit, besonders die ultravioletten Strahlen, die Fluoreszenz erzeugen. Er spricht den allgemeinen Satz aus: Im Fluoreszenzlicht ist die Brechbarkeit kleiner als in dem die Fluoreszenz erzeugenden Licht. Er zerlegt das auf einem Fluoreszenzschirm erzeugte Spektrum durch Betrachtung mittels eines um 90^0 gedrehten Prismas in zwei Teile (Pogg. Ann., Ergb. 4, p. 188, 1853). Hagenbach (1833—1910), der 36 Substanzen untersuchte, bestätigte den Stokesschen Satz und fand die Helligkeitsmaxima des Fluoreszenzlichtes (Pogg. Ann. 141, p. 248, 1870; 146, p. 66, 232, 375, 508, 1872). Dagegen zeigte Lommel, daß es auch Ausnahmen von dem Stokesschen Satze gibt (ib. 143, p. 30, 1871; 159, p. 514, 1876; 160, p. 75, 1872; Wied. Ann. 3, p. 113, 1878). Lallemand (1816—1886) fand die von ihm so benannte „isochromatische“ Fluoreszenz (Journ. d. Phys. 5, p. 329).

Auf Grund dieser experimentellen Ergebnisse baute Lommel dann seine Theorie der Absorption und Fluoreszenz aus, wobei er die Absorption als eine Art Resonanzerscheinung auffaßt, nach welcher das Fluoreszenzlicht von den so verändert schwingenden Atomen ausgesandt wird (Wied. Ann. 3, p. 251). Das sind Gedanken, die lebhaft an die Vorstellungen von L. Euler (s. oben) erinnern. Darauf gründet Lommel dann seine Theorie der normalen und anormalen Dispersion (ib., p. 339), die er gegen verschiedene An-

griffe verteidigt. Von Interesse ist dabei, daß er seine Formel auch mit der Helmholtzschen in Übereinstimmung bringen kann. Helmholtz hatte aus der Bewegungsgleichung des Äthers und der mitschwingenden Atome als gekoppelter Systeme die Dispersionsgleichung abgeleitet, welche durch die notwendige Bestimmung von vier Konstanten recht mühsame Rechnung verlangte. Lommel zeigte nun, daß man tatsächlich mit einer Näherungsformel und zwei Konstanten für alle normal dispergierenden Medien auskommt (ib. 8, p. 628, 1880). Die Arbeiten von Sellmeyer und Helmholtz veranlaßten Ketteler, seine Dispersionstheorie nun auch so auszubauen, daß sie die anormale Dispersion auch enthielt (Wied. Ann. 7, p. 608, 1880). Es hatte sich aber schon gezeigt, daß auch bei Adsoptionsstreifen mit einiger Annäherung die einfache Formel noch ausreicht (s. Wüllner, Wied. Ann. 17, p. 580, 1882).

Daß auch für Gase (spez. Luft) Dispersion zu finden sei, ist erst spät erkannt. Man bestimmte zunächst nur den Brechungskoeffizienten für weißes Licht. Nachdem schon Euler die Lichtbrechung in der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Temperatur bzw. von der Dichtigkeit berechnet hatte (Mém. Berlin 1754, p. 631), ist der Brechungskoeffizient wieder bestimmt durch Delambre (Laplace, Méc. cel. 4, p. 237, 1805) aus atronomischen Beobachtungen. Durch Kompression von Luft beobachteten Biot und Arago (Mém. Paris 7, p. 301, 1806) und fanden die Beziehung zwischen Brechungskoeffizienten und Dichte ausgedrückt durch die Gleichung $(n-1)/d = \text{const.}$ Erst Ketteler nahm diese Versuche wieder auf durch Beobachtung mit dem Jaminschen Interferentialrefraktometer (s. oben) und bestimmte damit n für die Fraunhoferschen Linien auf drei Stellen genau (Pogg. Ann. 124, p. 390, 1865). Mascart arbeitet ebenfalls mit Interferenz und bestimmt die Brechungskoeffizienten für die D-Linie und vier Cadmiumlinien (Ann. de l'éc. norm. 6, p. 9, 1877). Wiederum mit dem Jaminschen Apparat arbeiten Chappuis und Rivière und finden $(n-1)/d$ wirklich konstant (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 6, 15, 1888). Benoit (1844—1922) beobachtet in Newtonschen Ringen die Abhängigkeit von der Temperatur (Journ. de Phys. 8, p. 451, 1889). In überaus sorgfältiger Untersuchung mit einem Rowlandschen Konkavgitter haben Kayser und Runge die Dispersion der Luft in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmt für die Linien A bis U der Fraunhoferschen Bezeichnung (Wied. Ann. 50, p. 293, 1893). Es zeigte sich dabei, daß man hier mit zwei Gliedern der Cauchyschen Formel nicht auskommt, sondern erst

bei drei Konstanten Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Formel herstellen kann.

Die Untersuchung der Dispersion hatte sich bis dahin nur auf das sichtbare Spektrum bezogen; es war bei den fluoreszierenden Substanzen allerdings wohl versucht, sie auch für ultraviolettes Licht nutzbar zu machen, aber in dem Bereich der ultraroten Strahlen war nur für Quarz durch Mouton (C. R. 1879, p. 1078, 1189) und für Steinsalz von Langley (Wied. Ann. 22, p. 598, 1884) eine Reihe von Dispersionsmessungen ausgeführt. Erst Rubens hat durch außerordentlich elegante Methode die Dispersion ultraroter Strahlen gemessen (Wied. Ann. 45, p. 238, 1892). Diese Arbeit ist in mehrfacher Beziehung Ausgangspunkt für spätere Untersuchungen gewesen, die außerhalb des Rahmens dieses Buches liegen.

Phosphoreszenz.

In Aristoteles' περὶ ψυχῆς findet sich die Bemerkung, daß Holzschwamm, verwesendes Fleisch, Schuppen von Fischen die Fähigkeit haben, im Dunkeln zu leuchten. Später sind wohl noch spezielle Fälle mitgeteilt, aber diese Eigenschaft schien sich nur bei organischen Körpern zu finden. Bei anorganischen Substanzen wurde diese Eigenschaft zuerst von La Galla in De phaenomenis in orbe lunae, 1612, am Lapis bononiensis, der aus Schwerspat und Tonerde besteht, erwähnt. Die Entdeckungsgeschichte mit dem intelligenten Schuster ist unwahrscheinlich. Eingehend beschrieben und benutzt für Herstellung künstlicher Phosphore ist der Stein von A. Kircher (Ars magna etc., 1671, p. 18). Er meint, die Luft enthalte einen feinen Dunst, der sich leicht erleuchten lasse; von diesem Dunst sauge der Stein ein und strahle dann im Dunklen dies aufgesogene Licht wieder aus. Zunächst beschränkte man sich noch auf organische Substanzen, deren Beschreibung in Bartolinus' De luce animalium, 1669, nachgesehen werden kann. Auch Boyle (Phil. Trans. 1667, p. 581) und Beal (ib., p. 228) kommen nicht über die einfachen Erscheinungen hinaus, aber Boyle deutet wenigstens an, daß das zuerst von Kircher (Mundus subterraneus, 1665, p. 210) beschriebene Meeresleuchten mit den oben erwähnten Beobachtungen des Aristoteles in Zusammenhang stände (Phil. Trans. 59, p. 450). Über Irrlichter hat zum ersten Male leidlich vernünftig Dechales (1621—1678; Mundus mathem. 4, p. 692, 1674) geschrieben und sie vermutungsweise mit den obigen Beobachtungen in Zusammenhang gebracht.

Die erste, allerdings unvollständige chemische Untersuchung des „Leuchtsteins“ ist von Graf Marsigli (Acta Erud. 1698, p. 148) ausgeführt. Inzwischen waren aber andere „Phosphore“ entdeckt. 1676 beobachtete Picard das Leuchten des luftleeren Raumes im Quecksilberbarometer beim Schütteln und nannte dasselbe Merkurialphosphor (Hist. Paris II, p. 202, 1733). Erst Hauksbee († 1713) zeigte, daß dies mit Phosphoreszenz nichts zu tun habe (Phil. Trans. 1705, Nr. 303, p. 2129, und 1706, Nr. 307, p. 2277, 2327). Balduin stellte 1675 einen künstlichen Phosphor aus Kalkerde und Salpetersäure her, der durch längere Berührung mit Luft seine phosphoreszierende Eigenschaft verlor, daher hermetisch verschlossen aufbewahrt werden mußte (Balduini aurum superius etc. et phosphorus hermeticus, 1675). Balduin wollte Gold machen, das gleiche Ziel hatte Brandt; dabei fand er den wirklichen Phosphor aus dem Urin, 1669/77 (Miscel. Berolin. I, p. 91). Nachher haben Boyle (The aëreal noctiluca, 1680) und Kunkel (Labor. chem., 1716, p. 660) den Phosphor Brandts nachgemacht und in den Handel eingeführt.

Physikalische Untersuchung dieses Phosphors nahm Slare vor, bestimmte die Zeitdauer des Leuchtens von einem Gran bis zum Erlöschen, beobachtete, daß es verschiedene Arten des Phosphors gebe, die mehr oder weniger intensiv leuchteten. Er führt die Erscheinung auf ein langsames Verbrennen des Phosphors zurück (Acta Erud. 1682, p. 282). Zanotti untersuchte den Leuchtstein im Lichte des Spektrums und kam zu dem Schlusse, daß der Stein durch die Lichtstrahlen angeregt werde, sein eigenes Licht auszusenden (Comment. Bonon. 6, p. 205, 1731).

Du Fay (1698—1739) entdeckte wieder die schon von Albertus Magnus gesehene Eigenschaft des Diamanten, im Dunkeln zu leuchten (Opera, Lyon, II, 4) und fand sie auch beim Smaragd und anderen Edelsteinen (Mém. Paris 1734/36, p. 503), nachdem er schon 1730 bemerkt hatte, daß Kalkstein, Marmor und Gips phosphoreszierten (ib. 1728/30, p. 50). Aus der großen Zahl der Arbeiten im 18. Jahrhundert, welche die Auffindung und Beschreibung von Substanzen, die immer nur unter gegebenen Umständen phosphoreszierten, zum Gegenstand haben, hebe ich nur heraus Lane (1734—1807), der (Phil. Trans. 56, p. 107, 1764) zuerst beobachtete, daß Marmor durch den elektrischen Funken zum Phosphoreszieren gebracht wurde. Placidus Heinrich (1758—1825) hat alle bis dahin ausgeführten Untersuchungen in seinem großen Werke über die Lichterzeugung zusammengefaßt, Phosphoreszenz der Körper, 1811—1820. Er gibt

darin eine Reihenfolge der phosphoreszierenden Körper, vom besten, dem Flußspat, Kalksinter usw. bis zum Marienglas. Eine recht vollständige Zusammenstellung der vegetabilen Stoffe für Phosphoreszenz gibt Voigts Mag. für das Neueste (I, St. 4, p. 1, 1799). Die Erklärung für das Meerleuchten liefert Tilesius (Gilb. Ann. 61, p. 36, 147, 160, 1819). Daß bei der Erregung der Phosphoreszenz durch den elektrischen Funken nicht die Elektrizität, sondern das Licht, und zwar das dem Auge nicht wahrnehmbare, die Ursache sei, hat J. Seebeck (1770—1831) zuerst nachgewiesen (Goethe, Zur Farbenlehre, II, p. 708, 1810). Ausgedehnte Versuche, diese elektrische Erregung auch bei anderen Körpern nachzuweisen, sind von Pearsall gemacht (Pogg. Ann. 20, p. 252; 22, p. 566, 1830/31).

Von Grotthuß untersucht die Bedingungen, unter welchen die Körper phosphoreszieren; einige hatten diese Eigenschaft nur in Anwesenheit von Sauerstoff, in erster Linie sind das die organischen Phosphore. Er findet ferner, daß die Strahlen von Blau bis tief in das Ultraviolett am geeignetsten sind (Schweigg. Journ. 3, 1811; 14, p. 133, 1815). Heinrich (cf. Pogg. Ann. 49, p. 544, 1840) hat damals schon die Entdeckung gemacht, daß ein phosphoreszierender Körper, der durch Ausglühen seine Phosphoreszenz verloren hatte, durch den elektrischen Funken die Fähigkeit wiedererlangte. Diesem Verhalten widmete schon v. Grotthuß eine längere Untersuchung (Schweigg. Journ. 1814).

In einer größeren Anzahl von Arbeiten hat E. Becquerel (1820 bis 1891) die Phosphoreszenz untersucht und seine Resultate zusammengefaßt in La lumière, sa cause et ses effets (1867). Darin sind auch die Experimente zum Nachweis, daß die Farbe des Phosphorlichtes mit der Temperatur variiert. Vor allem interessieren aus diesen Becquerelschen Untersuchungen die, welche sich auf die Zeit und das „Abklingen" des Leuchtens nach der Belichtung beziehen (l. c., p. 244). Ist i_0 die Intensität unmittelbar nach der Belichtung, dann ist sie nach der Zeit $dt = i_0\,(1 - a\,dt)$, nach zwei Zeitmomenten also $= i_0\,(1 - a\,dt)^2$ usw. bis $i_0\,(1 - a\,dt)^n = i_t$. Also $\log i_t/i_0 = n \log (1 - a\,dt) = -\,n \left\{a\,dt + a^2\left(\frac{dt}{2}\right)^2 + \ldots\right\} = -\,at - a^2 t\,\frac{dt}{4} - \ldots$. Da $n\,dt = t$ ist, da ferner dt unendlich klein ist, wird $\log i_t/i_0 = -\,at$, oder $i_t = i_0 e^{-at}$. Bei den nur kürzere Zeit phosphoreszierenden Körpern bewahrheitet sich dieses Gesetz; bei längerer Dauer versagt es dagegen vollkommen. Ebenso ist das Gesetz, daß die Phosphoreszenzfarbe weniger brechbar ist als die erregende, nur eine Regel, die auch Ausnahmen hat. Becquerel

konstruierte zu diesen Messungen sein Phosphoroskop (ib., p. 249), welches noch heute vielfach gebraucht wird. Weitere Verbesserungen an diesem Phosphoroskop, besonders durch Einbau eines besonderen Triebwerkes, führte E. Wiedemann ein (Wied. Ann. 34, p. 450, 1888). Um als Lichtquelle besonders den elektrischen Funken zu gebrauchen, konstruierte Lenard ein sehr einfaches Phosphoroskop (ib. 46, p. 634, 1892).

Es war in den oben erwähnten Abhandlungen mehrfach die Frage aufgeworfen, ob nicht die Phosphoreszenz wesentlich durch die Erwärmung veranlaßt werde, da ja auch die Reibung (besonders beim Phosphor selbst) die Phosphoreszenz erregen kann. Diese Frage hat Kirchhoff gelegentlich seiner berühmten Arbeit über das Sonnenspektrum (s. unten) bereits dahin entschieden, daß das Phosphoreszieren nicht eine reine Wirkung der Wärme ist, sondern durch Veränderungen in dem Körper hervorgebracht wird (Abh. Berlin 1861, p. 38). Die Phosphoreszenz in Gasen ist erst durch die Geißlerschen Röhren der genauen Untersuchung zugänglich geworden. Auch für sie gilt der Kirchhoffsche Satz, wie Hittorf (Wied. Ann. 7, p. 884, 1879) zeigte.

Es zeigte sich schon in den Becquerelschen Versuchen (l. c.), daß die von Stokes (s. oben) gegebene Unterscheidung zwischen Fluoreszenz und Phosphoreszenz, daß nämlich erstere nur während der Bestrahlung vorhanden sei ohne Nachleuchten, nicht aufrecht erhalten bleiben könne, da auch fluoreszierende Körper nachleuchten. Die Bedingungen der Phosphoreszenz in Gasen sind von Hittorf (l. c.) genauer untersucht (cf. Pogg. Ann. 136, p. 1, 1869; J., p. 430, 1874) bei seinen Versuchen über die Elektrizitätsleitung. Daß Phosphoreszenz auch durch ultrarote Strahlen erzeugt wird, hat Lommel ausführlich nachgewiesen (Wied. Ann. 20, p. 847, 1883). In demselben Jahre zeigte Becquerel, daß die früher schon bei Phosphoreszenzlicht beobachteten dunklen Streifen Absorptionsstreifen der Substanz sind (C. R. 96, p. 1883).

Da sich durch alle Versuche über Fluoreszenz und Phosphoreszenz gezeigt hatte, daß die Ursache dieser Lichtaussendung nicht Temperaturerhöhung ist, so schlug E. Wiedemann für alle Lichtaussendung, die mehr oder weniger von der Temperaturerhöhung unabhängig war, den Namen Lumineszenz vor und will dann, wenn Belichtung die Lumineszenz veranlaßt hat, Photolumineszenz zur Bezeichnung gebrauchen, entsprechend Elektrolumineszenz usw. (Wied. Ann. 34, p. 446, 1888).

Spektralanalyse.

Schon Fraunhofer hatte beobachtet (l. c.), daß bei dem Spektrum einer gewöhnlichen Flamme (Kerze, Öllampe), welches kontinuierlich ist und keine dunklen Linien hat, sich auf dem kontinuierlichen Spektrum eine helle Linie abhebt, genau an derselben Stelle, wo er im Sonnenspektrum die *D*-Linie sah. Beim elektrischen Licht (Funken) sah er auf dem Spektrum eine größere Anzahl heller Linien. Als Brewster das Spektrum einer Alkoholflamme untersuchte, in welcher etwas Salz gelöst war, sah er nur die helle Linie *D* (Trans. Edinb. 9, p. 433, 1822). J. Herschel löste in Alkohol eine Reihe von Salzen, vor allem Chlorüre, und fand eine größere Zahl hellere Linien, je nach der Substanz, die er dem Alkohol zugemischt hatte (ib., p. 455). Talbot brachte in die Flamme Strontiumsalze und fand nun ein Spektrum roter Linien. Aus seinen Beobachtungen schließt er: „Man kann erwarten, daß die optischen Untersuchungen eines Tages ein neues Licht auf die Chemie werfen werden" (Edinb. Journ. 5, p. 77, 1826). Herschel beobachtete im Spektrum von salpetersaurem Strontium viele dunkle Linien und eine helle blaue (Corresp. math. phys. 5, p. 254, 1829).

Talbot stellte sich eine „monochromatische" Lampe her, indem er die blaue Flamme des Weingeists durch einen mit Kochsalzlösung getränkten Docht gehen ließ. Später führte Brewster eine solche Lampe mit „Ölgas" ein. Um die Gasflamme zunächst farblos zu haben, hat Brewster erkannt, daß er dem Gas hinreichend Luft beimischen muß, dann wird die Flamme auch heißer. Die Einrichtung ist sinnreich, aber unpraktisch und weitläufig (Edinb. Journ., 2. Ser., 1, p. 104 u. 108, 1829). Dies Problem wurde erst gelöst durch Bunsen in dem nach ihm benannten Bunsenbrenner (Pogg. Ann. 100, p. 85, 1857). Eine Verbreiterung des bläulichen Mantels der Bunsenflamme liefert der Terquembrenner (C. R. 91, p. 1484, 1880).

Wheatstone (1802—1875) untersuchte das Bogenlicht und fand da verschieden helle Linien je nach dem Metall, welches er für die Elektroden anwandte (Rep. of Brit. Assoc. 1835, p. 11). So ließ er den Funken aus Elektroden von Zn, Co, Sn, Bi, Pb erzeugen und fand charakteristische Linien für die Substanzen (Phil. Mag. 3, 7, p. 299, 1835). Schon vor ihm sprach Talbot zuerst den Satz aus, daß, wenn in einer Flamme eine oder mehrere bestimmte Linien im Spektrum auftreten, das diesen Linien zugehörige Metall in der Flamme vorhanden ist (Phil. Mag.

3, 4, p. 114, 1834). Während Wheatstone glaubte, daß das Spektrum des Funkens nur von den Elektroden abhänge und unabhängig von dem Gase, durch welches der Funke fliegt, sei, zeigte Ångström (1814—1874), daß man durch Druckverminderung in dem Gase den Einfluß der Elektroden ganz beseitigen kann und nur das Spektrum des leuchtenden Gases behält (Pogg. Ann. 94, p. 141, 1855). Die Untersuchung wurde nun sehr erleichtert durch die Herstellung Geißlerscher Röhren. In ausgedehntestem Maße untersuchte Plücker (1801—1868) die Spektren der Gase in Röhren (ib. 107, p. 497 u. 638, 1859).

Die schon erwähnten Beobachtungen Herschels über dunkle Linien fanden ihre Fortsetzung durch Miller (1817—1870) zunächst an Jod- und Bromdampf; dann ließ er Sonnenlicht durch Dämpfe und Gase fallen und beobachtete die Absorptionsstreifen. Er kam zu dem Resultate, daß alle farbigen Dämpfe und Gase ein Absorptionsspektrum liefern, die farblosen dagegen nicht (Phil. Mag. 3, 2, p. 381, 1833, und 27, p. 81, 1845). Daß letztere Meinung falsch ist, zeigte Janssen (1824—1907) an Wasserdampf und anderen Gasen (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 4, 23, p. 274, u. 24, p. 215, 1871). Ångström (l. c.) erklärte diese dunklen Linien aus dem Eulerschen Resonanzprinzip (s. oben), indem die Körper, welche in der Flamme die *D*-Linie stark gelb zeigen, dieselben Strahlen absorbieren, wenn sie von einem anderen Körper ausgehen, also dann eine schwarze Linie erzeugen.

Daß es sich bei den dunklen Linien um Absorption handelt, ist erst nach langem Kampfe anerkannt. Ich übergehe die zahlreichen Versuche, diese dunklen Linien des prismatischen Spektrums durch Interferenz zu erklären. In bezug auf das Sonnenspektrum wurde von Morren gezeigt, daß, wenn das Licht durch eine 2 m lange Röhre von Chlor ging, eine große Zahl neuer dunkler Linien sichtbar wurde (C. R. 68, p. 376, 1869). Schon frühzeitig hatte Brewster die sogenannten atmosphärischen Linien des Sonnenspektrums entdeckt (Pogg. Ann. 38, p. 61, 1836, und Phil. Trans. 1860). Die Absorption des in der Luft vorhandenen Wasserdampfes hat besonders durch Feststellung des Einflusses des Wassergehalts Cooke untersucht (Pogg. Ann. 128, p. 298, 1866).

Foucault (1819—1868) fand in dem Spektrum eines zwischen zwei Kohlespitzen übergehenden Lichtsbogens eine Menge heller Linien, besonders stark die *D*-Linie; als er dann durch diesen Bogen ein konzentriertes Bündel Sonnenlicht gehen ließ, war die *D*-Linie tief schwarz, stärker als im gewöhnlichen Sonnenspektrum. Er

schließt daraus: Ainsi l'arc offre un millieu qui émet pour un propre compte les rayons *D* et qui, en même temps, les absorbe lorsque ces rayons viennent d'ailleurs (Bull. de la Soc. philom. 1849, 7. Febr.). Ich setze den Wortlaut hierher, weil es noch heute Physiker gibt, die Foucault die Erfindung der Spektralanalyse vindizieren. Das wurde erst geleistet von Kirchhoff und Bunsen (Ber. Berlin 1859, p. 662).

Kirchhoff erzeugte das Spektrum des Drummondschen (1797 bis 1840) Kalklichts mit der intensiven hellen doppelten *D*-Linie. Dann stellte er in den Strahlengang eine Weingeistlampe mit Kochsalzlösung und fand die *D*-Linie schwarz. Nahm er statt des Kochsalzes ein Lithiumsalz, so fand er nun die rote Linie schwarz. Diese Resultate verallgemeinerte Kirchhoff zu dem Satze, daß für alle Schwingungen bei allen Körpern das Emissionsvermögen proportional dem Absorptionsvermögen bei gleicher Temperatur ist (Pogg. Ann. 109, p. 275, 1860). Bezeichnet also bei einer beliebigen Temperatur E das Emissionsvermögen, A das Absorptionsvermögen, so ist $E/A = c$. Diese Konstante ist nur abhängig von der Temperatur und Wellenlänge. Diesen Satz wandten Kirchhoff und Bunsen nun an auf die chemische Analyse (ib. 110, p. 161, 1860). Sie fanden durch dieselbe die Elemente Rubidium und Cäsium (Pogg. Ann. 113, p. 339, 1861), Crookes das Thallium (ib. 116, p. 495, 1862), Reich und Richter das Indium (cf. Erdmanns Journ. 89 u. 90, 1862; Pogg. Ann. 124, p. 637, 1865).

Nachdem durch diese Arbeiten die fundamentale Bedeutung der Spektralanalyse dargetan war, meldeten sich verschiedene Forscher als erste Erfinder. Ångström behauptete seine Priorität noch 1869 in Recherches sur la spectre solaire, p. 39, aber erstens ist sein Gedanke der alte Eulersche (s. oben), zweitens hat er die Emission bei hohen Temperaturen, die Absorption bei tiefen gemessen, konnte also gar nicht zu dem Kirchhoffschen Gesetz kommen. Ebenso sind die von Thomson für Stokes erhobenen Ansprüche (Ann. de Chim. et de Phys. 62, p. 190, 1861) zu beurteilen. Die von Stieren für Dr. Alter erhobenen Ansprüche gründen sich auf die Arbeit Alters (Sill. Amer. Journ., Ser. 2, 18, p. 35, 1859, und 19, p. 213), wo er zu dem Resultat kommt: Metalle im elektrischen Funken werden durch das Prisma erkannt und Gase geben durch den Funken charakteristische Spektren. Alter ist also nicht viel weiter gekommen als Talbot (1800—1877). Es ist sehr bezeichnend, daß der einzige, welcher wirklich den Kirchhoffschen Gedanken in einem Spezialfalle hatte, keine Reklamation erließ,

nämlich Foucault (s. oben), wohl weil er sich selbst sagte, daß er eben das allgemeine Gesetz nicht erkannt hatte. Kirchhoff war genötigt, die unbegründeten Ansprüche zurückzuweisen (Pogg. Ann. 118, p. 94, 1862). Darin wird auch nachgewiesen, daß Stewards (Edinb. Trans. 1858) angestellte Versuche über Emission und Absorption der Wärmestrahlen das Gesetz noch nicht liefern.

Aus seinem Gesetz zog Kirchhoff ferner den Schluß, daß alle Körper, wenn sie allmählich erhitzt werden, bei ein und derselben Temperatur Strahlen gleicher Farbe aussenden, also zunächst rot, dann gelb, bis schließlich weiß (Pogg. Ann. 109, p. 293, 1860). Damit wurde allgemein erwiesen, was Draper (1811—1882) in einem Versuch mit Kalk, Marmor, Flußspat, Kupfer usw. in einem Eisenrohr bereits experimentell gefunden hatte (Phil. Mag. 30, 1847). Den Einfluß der Dicke und Dichte der leuchtenden Schicht auf das Spektrum hat Zöllner (1834—1882) genauer untersucht (Pogg. Ann. 142, p. 91, 1871) und die Bedingungen festgestellt für die Entstehung eines Linienspektrums.

Schon vorher hatten Plücker und Hittorf den Unterschied von Linienspektren und Bandenspektren experimentell (speziell bei Stickstoff) festgestellt (Phil. Trans. 1865, p. 1). Plücker (1801 bis 1868) hatte schon vorher die Spektren von Gasen mit Hilfe der Geißlerschen Röhren untersucht, soviel ich sehe, zuerst veröffentlicht in Pogg. Ann. 103, p. 88, 1858. Doch waren die Röhren von Geißler (1815—1879) schon seit 1857 weit verbreitet, wie W. H. Th. Meyer sie bereits 1857 in Berlin benutzte (Über das geschichtete elektrische Licht, 1858). Da Gassiot im Sommer 1858 auch solche Röhren vorzeigte (Rep. Brit. Assoc. 1858), wird derselbe häufig als Erfinder genannt; vielleicht hat er sie nacherfunden.

Die Abhängigkeit vom Druck zeigte besonders Wüllner (Pogg. Ann. 137, p. 337, 1869, und 144, p. 520, 1871 usw.). Um nun den Übergang vom Linienspektrum zum Bandenspektrum zu gewinnen, mußte Wüllner annehmen, daß der Absorptionskoeffizient für verschiedene Wellenlängen eine verschiedene Funktion der Temperatur sei, und daß die Änderung der Dicke der Schicht geradeso wirke, wie eine Änderung der Dichte (Wied. Ann. 8, p. 593, 1879). Daß letztere Annahme nicht richtig ist, geht aus Versuchen von Janssen (C. R. 102, p. 1352, 1886) hervor, daß die Dunkelheit der Bandenspektren proportional dem Quadrat der Dichte zunimmt. Es stand darum der Wüllnerschen Theorie die sogenannte Molekulartheorie gegenüber. Ångström (Pogg. Ann. 144, p. 302, 1871) und

Schuster (ib. 147, p. 107, 1872) nahmen an, daß die einfachen Gase immer nur Linienspektren hätten und das Auftreten von Bandenspektren auf Verunreinigung hinweise. Daß letzteres nicht zutreffend ist, zeigten Versuche von Goldstein (ib. 154, p. 129, 1875). Danach wäre anzunehmen, daß die Moleküle veränderlich seien; werden dieselben dissoziiert, so verschwindet das Bandenspektrum und es tritt das Linienspektrum an seine Stelle. So gilt das Kirchhoffsche Gesetz mit der Zöllnerschen Erweiterung nur für unverändert bleibende Moleküle und solange die Zeit der Stöße den gleichen Bruchteil der Zeit der freien Bewegung bildet. Die Vergleichung der beiden Anschauungen ist sehr übersichtlich von Kayser gegeben (Wied. Ann. 42, p. 310, 1891). Nachdem E. Wiedemann seine Bedenken gegen Wüllners Theorie geäußert hatte (Wied. Ann. 10, p. 256, 1880), zeigte Ebert (1861 bis 1913), daß die Wüllnerschen Experimente nur durch Helligkeitsabnahme bedingt waren, daß die Dicke der Schicht keinen oder einen verschwindend kleinen Einfluß auf den Charakter des Spektrums haben kann (Wied. Ann. 33, p. 155, 1888).

Gesetzmäßigkeiten in den Spektren.

Da durch die Erscheinungen der Fluoreszenz und der chemischen Wirkungen des Lichtes (s. unten) nachgewiesen war, daß die Lichtstrahlen weit über das sichtbare Violett hinausgingen, war es naheliegender Gedanke, das Spektrum zu photographieren, um die ultravioletten Strahlen der Messung zugänglich zu machen. Das ist wohl zuerst von J. Müller (Freiburg; Pogg. Ann. 97, p. 135, 1856) ausgeführt. Diese Methode gab nun die Möglichkeit, die Linienspektren der Substanzen über das violette Ende hinaus zu verfolgen. Mascart (1837—1908) fand in dem Spektrum von Chlornatrium außer der Dublette *D* noch sechs solche Dubletten, bei welchen die Distanzen von der gleichen Ordnung waren und ebenso wiederholte sich das Tripel des Magnesiums dreimal. Das brachte ihn auf die Idee, daß eine harmonische Beziehung bestehen müsse nach Art der akustischen Intervalle für die verschiedenen Spektren (Journ. de l'Inst. 1863, 27. Mai, und C. R. 69, p. 337, 1869). Die vergeblichen Versuche, solche Harmonien zu finden, beendete Schuster durch den Nachweis, daß bei völlig willkürlicher Verteilung der Linien sich nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung ebensoviel ganzzahlige Verhältnisse zweier Linien finden müssen, wie in der Tat gefunden werden (Proc. R. S. 31, p. 337, 1880).

Die folgenden Versuche wollten irgendwelche gesetzliche Beziehungen unter den Linien eines Stoffes aufsuchen, so die von Liveing und Dewar (Phil. Trans. 1883, p. 213) für Li, K, Ca und Mg. Cornu verglich die Dubletts des Aluminiums und Thalliums mit denen des Wasserstoffs und glaubte, eine Beziehung linearer Art feststellen zu können (C. R. 100, p. 1181, 1885). Da erschien die von Hagenbach angeregte Arbeit Balmers über die Linien des Wasserstoffs. Ausgehend von den vier durch Ångström bestimmten Linien H_α bis H_δ fand er dieselben durch die Formel:

$$H = h \cdot m^2/(m^2 - n^2)$$

dargestellt, wo für $m = 3, 4, 5, 6,$ und für $n = 2$ zu setzen ist. Die Abweichung betrug noch nicht $1/_{40000}$ der Wellenlänge. Er dehnte die Rechnung dann aus über das Violett hinaus, wo Vogel noch fünf Linien bestimmt hatte. Für h fand er $3645{,}6 \cdot 10^{-7}$ mm. Auch auf die von Huggins gemessenen H-Linien der weißen Sterne dehnt Balmer seine Formel mit guter Annäherung aus (Wied. Ann. 25, p. 80, 1885). Deslandres fand in den Protuberanzen der Sonne noch fünf weitere H-Linien im Ultraviolett, auf welche die Balmersche Formel ebenfalls anwendbar war (C. R. 115, p. 222, 1892). Auf dem von Balmer eingeschlagenen Wege ging Rydberg weiter und untersuchte Thallium und Quecksilber. Für diese stellt er die Formel $u = u_0 - N_0/(m + m_0)^2$ auf, wo m die Ordnungszahl der Gruppe, $N_0 = 10{,}97216$ und u_0 und m_0 für jede Serie bestimmte Konstante sind (C. R. 110, p. 394, 1890).

Nun setzen die epochemachenden Arbeiten von Kayser und Runge ein. Sie gehen aus von der Balmerschen Formel, führen aber statt der Wellenlänge die Schwingungszahl ein, also λ^{-1}. Dann schreibt sich die Balmersche Formel $\lambda^{-1} = A + B \cdot m^{-2}$. Statt dessen nehmen sie die umfassendere Formel:

$$\lambda^{-1} = A + B\, m^{-2} + C\, m^{-4}\,.$$

Die ersten Versuche wurden von Runge mitgeteilt (Rep. Brit. Assoc. 1888, p. 576). Dann untersuchten sie die Spektren der Alkalien mit dem Konkavgitter Rowlands mit 20000 Furchen und photographierten das von 200 $\mu\mu$ bis 670 $\mu\mu$ reichende Spektrum von 2,3 m Länge. Sie unterscheiden Hauptserien, d. h. die scharfen, charakteristischen Linien des Elements und Nebenserien, wo die Linien nach beiden Seiten verbreitert erscheinen, oder wo sie nur auf der roten Seite verbreitert sind und lichtschwächer beobachtet

werden (Wied. Ann. 41, p. 302, 1890). Es zeigte sich dabei auch ein Unterschied zwischen Funkenspektrum und Bogenspektrum, dessen Ursache noch nicht aufgeklärt ist. Es folgte die Untersuchung der zweiten Mendelejeffschen Gruppe der Elemente unter Zugrundelegung der gleichen Formel wie bei den Alkalien. Nur für Barium gelang es nicht, trotz der 162 gemessenen Linien, Serien festzustellen (ib. 43, p. 385, 1891). Bei der Ausdehnung dieser Messungen auf Kupfer, Silber und Gold zeigte es sich, daß bei Gold keine Gesetzmäßigkeit festzustellen war; dagegen konnten bei Cu und Ag einige Linien zu Serien verbunden werden. Dagegen gelang es, die Elemente der beiden ersten Mendelejeffschen Gruppen in vier Abteilungen zu ordnen, die eine verwandte spektralanalytische Beziehung besitzen, und durch Beobachtung der Schmelztemperaturen läßt sich das Ausfallen von Gold und Barium verständlich machen (ib. 46, p. 225, 1892).

Von der dritten Gruppe der Elemente untersuchten Kayser und Runge nur Aluminium, Indium und Thallium und fanden bei allen dreien Serien. Auch diese drei bildeten eine zusammenhängende Gruppe insofern, als die Schwingungsdifferenzen annähernd wie die Quadrate der Atomgewichte wachsen (ib. 48, p. 126, 1893).

Die Vervollständigung der Serien durch Messung im Ultrarot, wo die photographische Methode ja versagt, welche daher von Snow (ib. 47, p. 208, 1892) mit Bolometer versucht ist, hat zwar für Lithium und Cäsium erwünschte Ergänzung gebracht, doch war sein Bolometer und seine Dispersion nicht ausreichend, die Linien hinreichend zu trennen und genau zu messen. Wesentlich ergänzt sind die Messungen von Kayser und Runge durch die Arbeiten von Rydberg (K. Svens. Vet. Acad. 23, Nr. 11, und Wied. Ann. 50, p. 625, 1893). Er will die von jenen benutzte Formel durch Einfügung einer vierten Konstanten verbessern und hält es für wahrscheinlich, daß alle Linien eines Spektrums in eine einzige Formel zusammengefaßt werden können, während die Intensitäten der Serien und der speziellen Linien mit der Temperatur und Dichte des glühenden Gases wechseln können (ib. 52, p. 114, 1894). Die über den Rahmen dieses Buches hinausliegende Forschung hat die Unterscheidung der Serien jedoch bestätigt.

Sonnen- und Sternspektrum.

Schon im Verfolg seiner ersten Mitteilung über Spektraluntersuchung hatte Kirchhoff das Sonnenspektrum sorgfältig untersucht mit einer bis dahin unbekannten Dispersion, die er durch vier hintereinander gestellte Prismen erreichte (Abh. Berlin 1861,

p. 1). Das Resultat war nicht nur eine außerordentliche Vermehrung der gemessenen Linien, sondern er wandte auch auf die Sonne sein Absorptionsgesetz an und erklärte demgemäß, daß die dunklen Linien, sofern sie nicht durch Absorption in der Atmosphäre bedingt sind, durch Absorption in der Sonnenatmosphäre entstehen müßten, daß man also, wenn diese dunklen Linien mit hellen Linien der Linienspektren von Gasen übereinstimmen, schließen müsse, daß die betreffenden Gase bzw. Dämpfe in der Hülle der Sonne vorhanden sein müssen. Damit beseitigte er die bis dahin meist angenommene Theorie Herschels, daß der Kern der Sonne dunkel und kalt sei und umgeben von einer dichten Wolkenschicht, über welcher eine leuchtende Hülle, die Photosphäre, gelagert sei. Diese Herschelsche Theorie war von den Sonnenflecken ausgegangen, so daß man in ihnen durch Einbruch der beiden äußeren Hüllen auf den Kern der Sonne sehen könne. Gestützt war diese Vorstellung durch die Beobachtung Aragos, daß am Rande der Sonne keine Polarisation des Lichtes eintritt, wie es bei Gasen sein muß (Ann. de Chim. et de Phys. 27, p. 89, 1824). Daß diese Hypothese auch mit dem thermischen Gleichgewicht unvereinbar sei, hat Kirchhoff ebenfalls zuerst betont.

Die Aussonderung der atmosphärischen Linien haben Brewster und Gladstone ausführlich betrieben (Phil. Trans. 1860, p. 149). Das ganze Sonnenspektrum ist dann von Ångström genau untersucht und nicht mehr mit willkürlichem Maßstab, wie bei Fraunhofer, ausgemessen, sondern nach Wellenlängen in dem Maßstab 10^{-6} mm (Recherches sur le spec. sol., 1868). Die erste Wellenlängenmessung ist von Fresnel ausgeführt, aber nur für eine rote Linie $\lambda = 638 \cdot 10^{-6}$ mm. Er hatte, wenn c die Breite der Öffnung, b die Entfernung des Schirmes von der Öffnung, δ_n die Entfernung zwischen n dunklen Streifen ist, abgeleitet $\delta_n = n \cdot \frac{b \cdot \lambda}{c}$ (Oeuvr. I, p. 273). Der Versuch ist angegeben ib., p. 325. Um auch bequem die Protuberanzen spektroskopisch untersuchen zu können, hatte Zöllner seinem Spektroskop (s. oben) eine besondere Form gegeben (Pogg. Ann. 138, p. 42, 1869) und dasselbe dann mit einem guten Amiciprisma so eingerichtet, daß man bequem direkt einen Stern beobachten kann (ib. 152, p. 503, 1874). Daß schon Fraunhofer auch Sternspektren aufgenommen hat, ist oben erwähnt; vielfach hat Zöllner in dieser Richtung gearbeitet, doch gehören diese Untersuchungen in das Gebiet der Astrophysik. Darum erwähne ich nur noch das zusammenfassende Werk von Scheiner, Spektralanalyse der Gestirne, 1890.

Wärmeverteilung im Spektrum.

Da die Lichtstrahlen stets mit Wärmestrahlen verbunden beobachtet wurden, war es natürlich, daß auch das Spektrum auf die Wärmeverteilung untersucht wurde. Zuerst hat wohl W. Herschel nachgewiesen, daß die Intensität der Erwärmung kontinuierlich wachse vom violetten Ende zum roten hin; darüber hinaus stellt er dann verschiedene Minimalstellen fest oder „kalte Banden" (Phil. Trans. 1800, p. 284). Sein Sohn J. Herschel führte diese Untersuchung mit wärmeempfindlichem Papier aus und nahm zunächst ein Flintglasprisma. Um die ungleiche Wärmeabsorption hier zu vermeiden, ersetzte er es durch ein Steinsalzprisma (ib. 1840, p. 1, und 1842, p. 181). Fizeau (1819—1896) fand mit schmalen Thermometern im Spektrum der Sonne die Herschelschen Minima wieder (Bull. Soc. philom. 1847, 11. 12., und Ann. de Chim. et de Phys. 15, p. 394, 1878). Die Messungen von Mouton (C. R. 89, p. 295, 1879) sind nicht fehlerfrei. Langley maß wohl zuerst mit dem Bolometer von 0,04 mm Breite in der Brückenkombination (Sil. Amer. Journ. 31, p. 1, 1886) und bestimmte die Lage der Minima sehr scharf. Er dehnte die Messung auch auf das Mondlicht aus (Mem. Nat. Acad. Sc. 4, p. 162, 1886) und fand, daß in diesem reflektierten Sonnenlicht die maximale Wärme noch mehr nach Ultrarot verschoben war wie bei der Sonne selbst (vgl. oben den Abschnitt über strahlende Wärme).

Geschwindigkeit des Lichtes.

Aus dem Altertum ist von Bedeutung nur die Bemerkung Herons (Katoptrik, Opera II_1, p. 322), daß die Geschwindigkeit des Lichtes so groß sei, daß wir sie nicht messen können. Er wendet sich damit gegen die Behauptung der Philosophen, daß die Ausbreitung der Lichtstrahlen instantan geschehe. Seine Begründung ist folgende: Ein abgeschossener Pfeil fliegt um so mehr geradlinig, je größer die Wucht ist, mit welcher er geschleudert wird. Da nun die Lichtstrahlen durchaus geradlinig sind, muß die Geschwindigkeit größer sein als die irgendeines irdischen Vorganges. Dem schließt sich Ptolemaios an und der Araber Alhazan (Opt. Thes. lib. VII, 1572). Um so auffallender ist, daß Porta (De refractione, p. 95, 1593) wieder zur Zeitlosigkeit der Lichtausbreitung zurückkehrt. Kepler dagegen kehrt zu Herons Meinung zurück (Epitome, l. c.). Der Galileische Versuch (La opere 13, p. 45, 1855), die Licht-

geschwindigkeit zu messen, der von der Accademia del Cimento (Saggi, Abt. XIII, 1841, cf. Tentamina Mus. II, p. 183) ausgeführt wurde mit einer Länge von 2 Meilen, mußte natürlich negativ ausfallen. Aber es ist auffallend, daß Descartes wieder zur instantanen Ausbreitung zurückkehrt; denn er hatte in seiner Dioptrica, c. II, 1637, bei der Erklärung der Brechung ganz richtig verschiedene Geschwindigkeiten des Lichtes in verschiedenen Medien angenommen. Sein Grund ist aber durchaus wissenschaftlich: Er sagt, wenn das Licht eine Geschwindigkeit im Weltraum hätte, so müßten aus seiner Geschwindigkeit und aus der Geschwindigkeit der Erde eine scheinbare Bewegung der Fixsterne folgen. Da diese jedoch nicht vorhanden sei, könne das Licht sich nur momentan ausbreiten.

Aus der dominierenden Stellung der Descartesschen Philosophie an der Pariser Universität erklärt sich, daß die Messung Olaf Römers (1644—1710) soviel Widerstand fand und Cassini, der an der Beobachtung einen wesentlichen Anteil hatte, von der Erklärung Römers sogar öffentlich zurücktrat. Am 9. 11. 1676 beobachteten Römer und Cassini, daß der erste Jupitermond um 10′ später aus dem Schatten des Planeten hervortrat als im August. Daraus schloß Römer, daß das Licht zum Durchlaufen der großen Achse der Erdbahn etwa 22′ gebrauche (Hist. Paris 1, p. 213, 1676). Nach derselben Methode ergibt sich mit dem Enkeschen Wert für den Durchmesser der Erdbahn = 41 393 520 Meilen und 986,38″ Verzögerung eine Geschwindigkeit von 41 965 Meilen. Mit dem Hansenschen Wert nahezu genau 40 000.

Das Descartessche Bedenken wurde behoben durch Bradley (1692—1762). Die Parallaxe der Fixsterne war vergeblich gesucht von Flamstead (Epist. 3, p. 107), von Cassini (Mém. Paris 1717), von Manfredi (Diss. de annuis iner. stel. aberrationibus, 1724), von ihm rührt die Bezeichnung Aberration her. Die letztere Arbeit veranlaßte Bradley, im Dezember 1725 in Kew mit einem Grahamschen Sektor von 24′ Radius die Sterne γ und δ Draconis, welche nahe beim Pol der Ekliptik stehen (der Anu der Babylonier um 2000 v. Chr.), genau zu untersuchen und fand, daß sie bei der oberen Kulmination etwas nach Süden abzuweichen schienen. Durch die bis ins Jahr 1728 fortgesetzte Beobachtungen stellte er fest, daß diese Sterne im Laufe eines Jahres eine Ellipse, deren große Achse der Ekliptik parallel nahezu 40″ betrug, beschrieben (genauer 40,5″). Einen Bogen von dieser Länge durchläuft die Erde in etwa 16′, so schloß er, daß das Licht etwa 16′ gebrauche, um die Achse der

Erdbahn zu durchlaufen. Daraus ergab sich $c = 41200$ Meilen (Phil. Trans. 35, p. 637, 1728). Mit diesen Resultaten begnügte man sich lange Zeit.

Da bei diesen astronomischen Messungen die Erdbahn die Basis ist, kam alles darauf an, diese möglichst genau zu messen. Dazu diente in erster Linie der Vorübergang der Venus vor der Sonne. Die Passagen 1761 und 1769 ergaben kein einheitliches Resultat, Halleys Methode lieferte 8,8″ als Parallaxe der Sonne, während Lalande 8,5 erhielt, Laplace nahm den Wert 8,81″ (Méc. cel.), aber Enke (1791—1865) bearbeitete das Beobachtungsmaterial von 1769 noch einmal und fand 8,57 (Astr. Nachr. 1822). Hansen (1795—1874) verband mit den Venusbeobachtungen die Mondbahnmessungen (Mon. Not. of the R. Astr. Soc. 15, p. 143, 1855) und Le Verrier (1811—1877) zeigte in einer Reihe von Arbeiten seit 1858, daß die Masse der Erde in Enkes Berechnung um ein Zehntel zu klein angesetzt war; er kam daher auf 8,84″, unter Zuhilfenahme der Marsbahn (C. R. 75, p. 165, 1872). Der Vorübergang der Venus 1874 lieferte 8,80″ ± 0,06″ und ähnlich die Beobachtungen von 1882. Eine Zusammenstellung dieser Beobachtungen gibt Obrecht (Rec. de Mém. etc. Paris 1890).

Die Bemühungen Wheatstones, die Geschwindigkeit der Elektrizitätsausbreitung zu messen (s. unten), veranlaßten Arago, eine Methode auszuarbeiten, die gestattete, die Lichtgeschwindigkeit ebenfalls auf der Erde zu messen und dabei zugleich eine experimentelle Entscheidung zwischen Undulations- und Emissionstheorie zu finden, indem das Licht einmal durch Luft und auf einem anderen Wege durch Wasser geleitet wurde und die Interferenz dieser beiden Strahlen zu beobachten war (C. R. 7, p. 954, 1838). Er führte diese Beobachtung freilich nicht aus und gibt als Grund an, daß seine Augen nicht mehr ausreichend seien, solche Methode anzuwenden (C. R. 30, p. 489, 1850). Aber seine Anregung blieb nicht unfruchtbar.

Fizeau ließ durch die Lücken eines schnell rotierenden Zahnrades Lichtstrahlen auf 8633 m zu einem Spiegel gehen, der dieselben in gleicher Richtung reflektierte, so daß man in einem Fernrohr diesen reflektierten Strahl beobachten konnte. Wenn das Zahnrad ruhte, ging der Lichtstrahl durch dieselbe Lücke, durch welche er entsandt war und im Fernrohr erschien der Spiegel hell, rotierte das Zahnrad so schnell, daß der zurückkommende Lichtstrahl auf den nächsten Zahn fiel, so war das Gesichtsfeld dunkel; fiel der reflektierte Strahl durch die nächste Zahnlücke, war das Feld wieder hell. Aus diesen Beobachtungen ergab sich der Wert $c = 313274304$ m

(C. R. 29, p. 90 u. 132, 1849). Cornu wiederholte die Fizeauschen Beobachtungen; als Mittel aus mehr als 1000 Versuchen ergab sich $c = 298400$ km in Luft mit einem möglichen Fehler von $^1/_{300}$ (C. R. 76, p. 338, 1873).

In der zweiten Arbeit Aragos (s. oben) hatte er auf Anraten von Bessel vorgeschlagen, mit einem rotierenden Spiegel die Interferenz zu erzeugen. Diesen Gedanken führte Foucault (1819—1868) aus und stellte fest, daß der Undulationstheorie entsprechend die Fortpflanzung des Lichtes in Wasser langsamer ist als in Luft (C. R. 30, p. 551, 1850). Dann benutzte er den rotierenden Spiegel, der direkt auf die Achse einer Turbine gesetzt war, um nach fünfmaliger Reflexion an Konkavspiegeln, die nur einen Abstand von etwa 4 m hatten, die Interferenz zwischen ursprünglichem und reflektiertem Strahl meßbar zu machen. Daraus ergab sich der Wert $c = 298000$ km, mit einem höchsten Fehler von 500 km in Luft (C. R. 55, p. 501 u. 792, 1862). Mit Fizeaus Methode arbeiteten Young und Forbes, mit dem Resultat $c = 301382$ km mit $^1/_{100}$ Fehler (Phil. Trans. 1882, p. 231). Michelson bediente sich der Foucaultschen Methode, bei welcher die Tourenzahl des Spiegels durch die Tonhöhe der Rotation bestimmt wurde (Astr. pap. I, p. 109, 1882); Resultat $c = 299853$ km. Mit ganz besonderer Sorgfalt suchte Newcomb zu arbeiten nach Foucaults Methode, wobei der Spiegel rechts und links gedreht werden konnte; Resultat 299860 ± 30 km (ib. II, 1885, part 3 u. 4).

Für die Interferenzversuche mit Hilfe von Spektrallinien hatte sich schon in den Untersuchungen von Fizeau (Ann. de Chim. et de Phys. 26, p. 138, 1845, bis ib. 66, p. 469, 1862) herausgestellt, daß die Breite der Spektrallinien eine wesentliche Rolle spiele, daß diese aber nicht konstant ist. Die Verbreiterung ist außerdem nicht symmetrisch, sondern nach Rot hin stärker und wesentlich bedingt durch die Dampfmenge in dem Brenner, wie Ebert in seiner Habilitationsschrift nachweist (Wied. Ann. 34, p. 39, 1888). Bei dieser Untersuchung zeigt Ebert (1861—1913), in welcher Weise die Breite der Spektrallinien zusammenhängt mit der bei Interferenz zu erreichenden Höhe des Gangunterschiedes der beiden Strahlen. Er weist das Gesetz von J. J. Müller (Ber. Leipzig 23, p. 19, 1871) zurück und zeigt, daß die Eigengeschwindigkeit der Moleküle einen Einfluß auf die Wellenlänge hat, daß daher das Dopplersche Prinzip nicht ohne weiteres auf leuchtende Moleküle angewandt werden darf (ib. 36, p. 466, 1889).

In bezug auf den Einfluß der Bewegung der leuchtenden Körper wird oft angeführt, daß Newton bei den Monden des Jupiter die

Farbenveränderung schon beobachtet habe in einem Briefe an Flamstead (Baily, An account of the Rev. Flamstead, 1835, p. 129). Allein die Farben, welche er da angibt, sind verkehrt. Es kann die Priorität Dopplers (1803—1853) nicht bezweifelt werden, der richtig sagt, daß ein Stern, welcher sich uns nähert, seine Farbe nach Blau hin verändert; wenn er sich entfernt, so tritt die rote Färbung ein (Abh. böhm. Ges. d. W. II, p. 465, 1842). Durch Beobachtung der Tonerhöhung und Erniedrigung bestätigte Buys-Ballot das Dopplersche Prinzip (Pogg. Ann. 66, p. 321, 1845). Arago macht darauf aufmerksam, daß der optische Effekt nur beobachtet werden kann, wenn die Geschwindigkeit des Sternes eine hinreichende Größe habe (C. R. 36, p. 38, 1853). Auf die außerordentliche Bedeutung des Dopplereffekts in der Astrophysik einzugehen, ist hier jedoch nicht der Ort.

Dagegen interessiert allgemein die Frage, ob der Äther an der Bewegung des Mediums teilnehme, oder ob es gleichgültig sei für die Lichtgeschwindigkeit, ob das Medium in Bewegung oder in Ruhe sei. Die Frage ist angeregt durch Fresnel (Oeuvres II, p. 627). Beer hat die Geschwindigkeitsmessungen Fizeaus benutzt, um theoretisch die „Korreption“ zu bestimmen. Er führt den Korreptionskoeffizienten $u = 1 - \frac{1}{n^2}$ ein, wo n der Brechungsindex ist, und findet als Endresultat, daß ein Teil des Äthers mitgerissen wird, ein Teil $\left(\text{etwa } \frac{1}{n^2}\right)$ aber in Ruhe verharrt (Pogg. Ann. 93, p. 213, 1854, und 94, p. 428). Fizeau versuchte, die Frage zu lösen, indem er den Lichtstrahl einmal in Richtung des fließenden Wassers, das andere Mal in entgegengesetzter Richtung gehen ließ und die beiden Strahlen zur Interferenz brachte (Ann. de Chim. et de Phys., Ser. 3, 57, p. 385, 1859) und fand, daß der Äther von dem Medium mitgeführt werde. Zu dem gleichen Resultat führten die Untersuchungen von Ketteler (Pogg. Ann. 144, p. 369, 1871). In großem Maßstabe stellten dann Michelson und Morley den gleichen Versuch wie Fizeau an und kamen zu dem gleichen Resultat (Amer. Journ. of Sc. 31, p. 377, 1886) für Wasser, während für Luft die Größe der Verschiebung nicht meßbar wurde.

Inzwischen hatte Michelson den Versuch gemacht, die Frage, ob der Äther ruhe oder von der Erde bei ihrer Rotation und Revolution mitgenommen werde, durch eine dem Jaminschen Interferenzapparat entsprechende Anordnung zu prüfen, wobei die hin und zurück gehenden Strahlen Interferenz erzeugen. Ist der Weg horizontal, so muß die Erdbewegung, falls sie den Äther mitreißt, einen

Einfluß auf die Lage der Interferenzstreifen haben. Nun läßt Michelson den Apparat um 90° drehen, dann steht der Lichtweg senkrecht zur Ätherströmung; sie hat also keinen Einfluß. Michelson konnte aber keine Verschiebung der Interferenzstreifen sehen, daraus schloß er, daß der Äther sich mit der Erde bewegt (Amer. Journ. of Sc. 21, p. 20, 1881). Damit wäre eine Entscheidung zugunsten der Ansicht von Stokes gegeben, daß der Äther sich mit dem Medium bewege (Phil. Mag. 26, p. 9, 1845; 28, p. 76, und 29, p. 6, 1846), während Young der Ansicht war, daß der Äther ruhe relativ zu dem sich bewegenden Körper (Phil. Trans. 1804, p. 12). Die Kritik dieser Versuche durch H. A. Lorentz (Arch. Néerl. 21, p. 103, 1886) veranlaßte Michelson, mit Morley die Versuche in größerem Stile zu wiederholen (Amer. Journ. of Sc. 34, p. 333, 1887), mit nahezu gleichem Erfolg wie 1881. Es zeigte sich also, daß Fresnels Formel nur als erste Annäherung gebraucht werden kann, daß durch optische Beobachtungen auf der Erdoberfläche die Bewegung der Erde nicht erwiesen werden kann und nur relative Bewegungen beobachtet werden können. Nun bewies Lorentz in Verbindung mit Fitzgerald, daß die Michelsonschen Versuche ohne Beweiskraft seien, da man mit einer allgemeinen elektrodynamischen Theorie zu dem Schluß kommen muß, daß die Maßstäbe sich verkürzen oder verlängern, je nachdem der Beobachter sich nähert oder von ihm sich entfernt (Arch. Néerl. 25, p. 363, 1892). Über Lorentz' Theorie wird am Schlusse der Elektrizitätslehre weiter gehandelt.

Photometrie.

Es ist selbstverständlich, daß der Mensch sich von Anfang an des ihm angeborenen Photometers bedient hat und Lichtstärken unterschied nach der Stärke des Lichteindrucks im Auge, und bei den meisten noch heute gebrauchten Photometern ist dieser individuelle Faktor noch das Entscheidende. Man kommt dem Auge etwas zu Hilfe, um ihm die Entscheidung zu erleichtern, aber überläßt diese doch der Sinnesarbeit. Nur wenige Einrichtungen suchen nach einem objektiven Maße für Lichtintensität, Helligkeit, Erleuchtungsstärke usw. Etwas über das rein Subjektive Hinausgehendes findet sich erst bei Bacon von Verulam (De interpretatione naturae, p. 746, 1665), der fordert eine Untersuchung, warum uns das eine Licht heller erscheine als das andere, ob ein dunkleres Licht ein helleres verstärke oder schwäche (Frage 6 und 7).

Der erste, welcher wirklich Lichtmessung unternahm, war Huygens; er nahm eine Doppelröhre von 12 Zoll; am einen Ende war in den Deckel ein Loch von $^1/_{12}$ Linie Durchmesser angebracht, im Verschluß der anderen Seite befand sich ein Gaskügelchen von $^1/_{24}$ Linie Radius. Das erste Rohr richtete er auf den Sirius, das zweite auf die Sonne, von welcher er auf diese Weise den 27664. Teil besehen wollte; dann erschienen ihm beide Objekte gleich hell (Kosmotheoros II, p. 135, 1698). Kurz darauf erschien das erste, allerdings verfehlte, Photometer von Franz Maria. Er schnitt eine große Zahl gleich dicker Glasplatten und stellte fest, wie viele er aufeinanderlegen müsse, damit das Licht völlig unsichtbar würde; so war die Stärke des Lichtes der Anzahl dieser Platten proportional (Nouv. découv. s. l. lum., Paris 1700). Es ist auffallend, daß der fehlerhafte Gedanke dieses Apparates eine Wiederholung fand in dem Photometer des Lampadius (Schweigg. Journ. 10, p. 124; 11, p. 361, 1814). Eine ausziehbare Röhre ist an einem Ende mit einer Milchglasplatte verschlossen; auf diese werden so viel Scheiben aus „englischem Laternenhorn" in eine Holzfassung gelegt, bis das Licht verschwindet. Er nimmt wie Maria an, daß die Absorption in arithmetischem Verhältnis wachse; sein Resultat, daß das Sonnenlicht nur etwa doppelt so stark sei wie das Mondlicht, hat ihn nicht stutzig gemacht.

Schon O. v. Guericke macht auf den Intensitätsverlust durch Reflexion aufmerksam, aber sein Meßapparat ist sein Auge. Er sagt freilich, man könne das Licht so oft reflektieren lassen, bis es vollständig verschwinde für unser Auge; er sieht auch, daß das Verhältnis geometrisch abnehme, aber hat daraus keine Photometrie abgeleitet (Exp. Magd. V, p. 141, 1672). Mairan berichtet über ein Photometer von Celsius, welcher auf einen weißen Schirm drei kleine konzentrische Kreise gezeichnet hatte. Er stellte diesen Schirm in verschiedene Entfernungen vom Auge, so daß er die Kreise eben noch deutlich unterscheiden konnte, und maß dann die nötige Entfernung der Lichtquelle und glaubte, das Gesetz gefunden zu haben, daß letztere Entfernung sich umgekehrt wie die vierten Potenzen der Entfernung des Auges von dem Schirm verhalte (Hist. Paris 1735, p. 5). Das Fehlerhafte dieses Prinzips weist Bouguer nach (s. unten). Buffon nahm diese Versuche wieder auf (Mém. Paris 1743, p. 14, und 1747, p. 42). Er ließ einen Sonnenstrahl in einem finsteren Zimmer auf einen weißen Schirm fallen, daneben einen von einem Spiegel reflektierten; leitete er zwei reflektierte Strahlen auf dieselbe Stelle, so schien ihm diese ebenso

hell, wie die direkt erleuchtete; daraus schloß er, daß durch die Reflexion die Hälfte verloren sei! Mit Kerzenlicht war sein Versuch etwas vorsichtiger. Um die Buchstaben eines Buches unterscheiden zu können, mußte die Kerze 24′ vom Buche entfernt sein; um dasselbe nach Reflexion des Lichtes durch einen Spiegel zu können, mußte das Licht auf 15′ dem Spiegel genähert und das Buch auf $^1/_2$′ an den Spiegel herangebracht werden. Er schloß daraus, daß die Intensitäten des Lichtes vor und nach der Reflexion sich wie 576 : 225 verhalten.

Bouguer (1698—1758) ließ das Licht einer Kerze auf zwei Spiegel unter gleichem Winkel fallen, beobachtete das Bild des einen direkt, das des anderen nach mehrmaliger Reflexion von einem dritten Spiegel in gleicher Richtung und verschob das Licht so lange, bis beide Bilder gleich stark erschienen. Dann wählte er auch die Anordnung von Buffon mit zwei in ein dunkles Zimmer fallenden Sonnenstrahlen; aber er brachte die beiden nebeneinander liegenden Bilder auf gleiche Helligkeit durch Verkleinerung der Öffnung für den direkt beobachteten Strahl. Er hat dann die Reflexionsfähigkeit verschiedener Substanzen untersucht und findet die Oberfläche von Hg als beste Spiegelfläche mit geringster Absorption; die Abhängigkeit des Intensitätsverlustes bei verschiedenen Neigungswinkeln bietet Bouguer in Tabellen; die stärkste Reflexion mit geringstem Lichtverlust gibt die Totalreflexion, deren Entdeckung von ihm freilich Edwards zugeschrieben wird, während sie Kepler mehr als 100 Jahre früher entdeckt hatte (s. oben; Essai d'optique 1729, vollständig im Traité d'optique, 1760).

Ebenso bestimmt Bouguer den Lichtverlust beim Durchgang durch ein Medium und berechnet z. B., daß das Seewasser bei 679′ Dicke kein Licht mehr durchlasse. Es kommen bei ihm auch einige Bemerkungen über die verschiedene Absorptionsfähigkeit der Luft für verschiedene Farben vor. Diese letztere Frage wird sehr unzulänglich von Musschenbroek untersucht (Introd. ad phil. nat. II, p. 800), noch weniger exakt von Canton und Priestley (History etc. 1772, deutsch 1775, p. 311).

In dem gleichen Jahre wie Bouguers Traité erschien Lamberts Photometria. Er unterscheidet Helligkeit (claritas visa) und Erleuchtung (illuminatio); letztere nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab, die Helligkeit aber nicht; Beispiel die Sterne. Lambert (1728—1777) behandelt zunächst die Erleuchtung; sie verhält sich 1. wie die Oberfläche des erleuchtenden Körpers, 2. umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung, 3. umgekehrt wie der Sinus des

Neigungswinkels gegen die erleuchtete Ebene, 4. wie der Sinus des Winkels, den die Strahlen mit der leuchtenden Fläche machen. Diese vier Sätze beweist er durch Versuche und Beobachtung. Dann untersucht er die Helligkeit, wobei die Absorption der Luft sehr ausführlich besprochen wird. Er nennt einen Körper weiß, wenn er alle senkrecht auffallenden Strahlen ungekürzt zurückwirft. Besonders eingehend behandelt Lambert das Licht des Planetensystems unter Vermeidung der Fehler, welche in den vorherigen Arbeiten über diesen Gegenstand teils durch Verschmelzung von Erleuchtung und Helligkeit, teils durch Vernachlässigung des Emanationswinkels begangen waren. So bei Thümmig (Diss. de prop. lum. 1721), Kies (Mém. Berlin 1750, p. 218), Euler (ib., p. 280), Bouguer (l. c., p. 85). Letzterer hat mit zwei Photometern gearbeitet. Das eine bestand aus zwei Brettern, welche unter einem Winkel von 120° aneinander befestigt waren und zwei gleich große Löcher, mit geöltem oder weißem Papier beklebt, in gleicher Entfernung von der gemeinsamen Kante hatten; ein drittes längeres Brett, ebenfalls unter 120° mit den beiden ersten, diente dazu, die Vermischung der Lichtstrahlen der beiden zu vergleichenden Lichtquellen zu verhüten; durch eine Decke wurde dafür gesorgt, daß in das beobachtende Auge kein fremdes Licht eindringen konnte. Für die Messung bei Gestirnen ersetzt er die Bretter durch zwei in einem Gelenk drehbare Röhren, die dem Auge zugewandt ebenfalls die kleinen Löcher mit weißem Papier haben, während sie oben offen sind. Das eine Rohr ist ausziehbar, um bei verschiedenen Intensitäten gleiche Beleuchtung der Papierscheiben zu erzielen. Endlich änderte er diese Röhren so ab, daß er in die oberen Öffnungen zwei gleiche Linsen setzte, die das Licht auf die Papierstücke konzentrierten; dann konnte durch eine Blende vor der einen Linse die Öffnung so verkleinert werden, daß die Papierstücke gleich hell erschienen.

Das unter dem Namen Rumfords (1753—1814) in den Lehrbüchern aufgeführte Photometer ist nur ein für den Schulbetrieb vereinfachter Apparat. Derselbe wird in einfachster Form, so wie er heute in den Schulen gebraucht zu werden pflegt, schon von Bouguer gelegentlich zur Photometrie benutzt (Traité des Ombres etc. 1740). Das ursprüngliche Photometer des Grafen hat mit diesem nur das Prinzip gemein, daß zwei Schatten miteinander verglichen werden. Der erste Apparat Rumfords (Gren, Neues Journ. II, p. 15, 1795, aus Phil. Trans. 1794, I, p. 67) war ein sorgfältig konstruierter kompakter Apparat, in welchem in einem geschlossenen schwarzen

Kasten auf einer mit weißem Papier bezogenen Spiegelfläche durch zwei unter 60° geneigten, in Röhren eingeschlossenen Lichtstrahlen von zwei gleichen schwarzen Zylindern unmittelbar nebeneinander Schatten erzeugt wurden, die durch eine in der Normalen zur weißen Fläche liegende Öffnung beobachtet wurden. Es war durch genaue mechanische Konstruktion dafür gesorgt, daß die Schatten gleich breit und die Lichter stets gleich hoch und in der Achse der Röhren bewegt werden konnten. Rumford ist der erste, welcher darauf hinwies, daß man ein „Normallicht" haben müsse, um genau photometrieren zu können. Er wählte die Argandlampe und führte eine große Reihe Absorptionsbestimmungen damit aus, besonders in bezug auf Ökonomie der Beleuchtung. — Argand (1755—1803) hat 1783 einen Brenner mit doppeltem Luftzug für Öllampen konstruiert, wo dem ringförmigen Dochte im Innern Luft zugeführt wurde, während bis dahin die Öllampen mit Dochtschnüren brannten. Er vermied dadurch das Qualmen und erhielt ein für längere Zeit konstantes Licht (Découv. des Lampes à courant etc., Genf 1785). — Der Schulapparat Rumfords ist erst später beschrieben (Gilb. Ann. 45, p. 306, 1813, und 46, p. 227, 1814). Der von Leslie als Photometer bezeichnete Apparat (Nicholsons Journ. 3, 1799) ist nichts anderes als ein Sturmsches Differentialthermometer (s. oben) mit einer schwarzen und einer weißen Kugel und benutzt also die Wärmestrahlen und hat mit Lichtmessung nichts zu tun.

Der erste, welcher die Lichtstärke der Spektralfarben zu messen unternahm, war W. Herschel (Phil. Trans. 1800, I, Nr. 13). Er beleuchtete das Objekt auf dem Tische eines Mikroskops mit 42facher Vergrößerung durch die farbigen Strahlen eines Prismas mit Sonnenlicht und bestimmte die Lichtstärke durch die Anzahl und Schärfe der Strukturteile des Objekts mit dem Resultat, daß die größte Lichtstärke an der Grenze von Gelb und Grün liege, nach Rot und Violett aber ziemlich gleichmäßig abfalle. Erst sehr viel später sind diese Versuche wieder aufgenommen.

Ritchie stellt in einen länglichen Kasten, der an den Schmalseiten offen ist, zwei rechtwinklig zueinander stehende weiße Papierflächen und beobachtet von oben deren Helligkeit. Die Lichter werden so weit verschoben, daß die Flächen gleich hell erscheinen (Edinb. Journ. of sc. V, p. 139, 1826). Auch hier ist die subjektive Empfindung das Entscheidende, daher unsicher.

Eine große Zahl von Photometern ist konstruiert; es muß genügen, hier nur die anzugeben, welche ein neues Prinzip zugrunde legen. De Maistre vergleicht das Licht der Sterne, indem er den

einen Stern direkt, den anderen durch das Fernrohr beobachtet, vor dessen Objektiv eine Prismakombination von einem weißen und einem blauen Prisma (brechender Winkel 11°) angebracht ist. Die aufeinandergelegten Prismen werden so lange verschoben, bis ihre Dicke hinreicht, um beide Sterne gleich hell erscheinen zu lassen (Bibl. univer. 51, p. 323, 1832). Daß dies Prinzip völlig verfehlt ist, sieht Quetelet ein; darum benutzt er die Lichtschwächung durch Reflexion und läßt das Licht des stärkeren Sternes so oft innerhalb einer weißen, dicken Glasplatte reflektieren, bis beide gleich hell erscheinen (ib. 52, p. 212, 1833). Das gleiche Prinzip hatte schon Brewster (1781—1868, Trans. Edinb. 1815) angewandt. Ganz unzulängliche Voraussetzungen macht Potter bei seinem Photometer (Pogg. Ann. 29, p. 487, 1833). Herschel hatte, um die Absorption zu messen, zwei Bretter mit gleich großen Löchern von ein und derselben Lichtquelle erleuchtet, aufgestellt; die eine Öffnung wurde mit dem durchsichtigen Körper bedeckt und dann dies Brett so nahe an die Lichtquelle gebracht, daß beide Löcher gleich hell erscheinen (Gilb. Ann. 12, p. 522, 1803). Das Osannsche Photometer beruht auf der Beobachtung, daß der Lichteindruck, von einer erleuchteten Fläche durch ein enges Rohr betrachtet, bei einer bestimmten Entfernung je nach der Intensität verschwindet. Die Lichtstärken verhalten sich dann wie die Quadrate der Entfernungen (Pogg. Ann. 33, p. 418, 1834). Für Astrophotometrie war von der Göttinger Gesellschaft der Wissenschaften ein Preis ausgeschrieben. Steinheils Arbeit wurde gekrönt (Pogg. Ann. 34, p. 646, 1835). Er schneidet die Objektivlinse eines Fernrohrs vertikal durch; jeder Hälfte wird durch je ein vorgesetztes Prisma mit totaler Reflexion das Licht je eines Sternes zugeführt, aber auf dem Schirm wird nicht das scharfe Bild des Sternes erzeugt, sondern er wird weiter von dem Objektiv entfernt, so daß eine beleuchtete Fläche entsteht. Durch Diaphragmen sind die beiden Flächen, unmittelbar nebeneinander erzeugt, auf gleiche Helligkeit gebracht. Diesem Konstruktionsprinzip folgen Babinet (C. R. 37, p. 744, 1853), Becquerel (Ann. de Chim. et de Phys. 62, p. 14, 1861), Wolf (Journ. de Phys. 1, p. 81, 1872) und Cornu (ib. 10, p. 189, 1881), die sich dadurch unterscheiden, wie die Abschwächung des starken Lichtes erreicht wird.

An dem einfachen Schattenphotometer von Bouguer machte Potter die Verbesserung, daß er die Schatten auf einem transparenten Papierschirm entwarf und von der dem Lichte entgegengesetzten Seite beobachtete (Edinb. Journ. 3, p. 284, 1830). Foucault stellte solchen Schirm her, indem er zwischen zwei Glasplatten eine

dünne Schicht Stärkemehl ausbreitete und die ganze Vorrichtung mit den Lichtern in einen abgeschlossenen Kasten brachte, und Crova ersetzte dies Stärkemehl durch das Mehl von Runkelrübensamen (Ann. de Chim. et de Phys. 6, p. 342, 1885). Mit diesem Photometer wurde in Paris offiziell die Gasbeleuchtung gemessen.

Sehr viel zuverlässiger als alle bisher genannten Apparate ist das Bunsensche Photometer, ein Stearinfleck auf einem weißen Papierschirm, von beiden Seiten gleich stark beleuchtet, verschwindet; erscheint in stärkerer Belichtung schwarz, in schwächerer hell (Pogg. Ann. 63, p. 578, 1844). Um dies Verschwinden des Fettfleckes sicherer beobachten zu können, sind verschiedene Einrichtungen angebracht; denn es zeigte sich, daß dies Verschwinden abhängig ist von dem Winkel, unter welchem man den Schirm betrachtete. Darauf hat wohl Toepler (1836—1912) zuerst aufmerksam gemacht (Wied. Ann. 8, p. 640, 1879); sein Vorschlag, den Stearinfleck durch Pergamentpapier zu ersetzen, hebt den Übelstand nicht. Vorausgesetzt, daß der Stearinfleck auf beiden Seiten des Schirmes ganz gleichartig ist, gibt die Methode, durch ein Rohr das Bild des Schirmes auf zwei symmetrischen Spiegeln zu betrachten, für die Praxis recht genügende Resultate. Die Leistungsfähigkeit dieses Bunsenschen Photometers ist genauer untersucht von L. Weber (Wied. Ann. 31, p. 676, 1887).

Statt des Schirmes eine Glasphotographie im reflektierten und durchscheinenden Lichte zu untersuchen, ist zuerst vorgeschlagen von Pouillet (C. R. 35, p. 373, 1852) und von Dove für ein Photometer benutzt (Pogg. Ann. 114, p. 145, 1861). Der alte Buffonsche Gedanke (s. oben) ist von L. Weber wieder aufgenommen (Wied. Ann. 20, p. 335, 1883). In derselben Arbeit gibt Weber auch ein Photometer für gleichfarbiges, diffuses Licht an, wo die beiden beleuchteten Flächen unmittelbar aneinander liegen, und eine andere Methode, die Intensität der verschieden gefärbten Lichtstrahlen durch Erkenntlichkeit von Figuren zu prüfen. Die Zulässigkeit dieses Prinzips ist durchaus zweifelhaft und bisher nicht erweisbar gewesen.

Um den stärkeren Lichtstrahl so abzuschwächen, daß die Bilder gleich hell erscheinen, war in den bisherigen Untersuchungen entweder die größere Entfernung oder die Reflexion benutzt. Arago ist wohl der erste gewesen, der die Polarisation in einem Doppelspat benutzen will. Da der ordentliche und außerordentliche Strahl gleiche Intensität haben, also jeder die Hälfte des ursprünglichen, kann man die Hälfte und bei weiterer Teilung Viertel usw. herstellen.

Oder wenn man vollständig linear polarisiertes Licht in einen Doppelspat eintreten läßt, dessen Hauptschnitt mit der Polarisationsebene den Winkel φ bildet, so stellt man zwei Lichtstrahlen von der Intensität $i \sin^2 \varphi$ und $i \cos^2 \varphi$ her, hat also jeden Grad der Abschwächung durch Messung von φ zur Verfügung (Oeuvres 10, p. 180). Nach diesem Prinzip sind konstruiert die Photometer von Beer (Pogg. Ann. 86, p. 78, 1852), Bernard (C. R. 36, p. 728, 1853). Besonders für Sternlichtuntersuchungen konstruiert ist das Photometer von Zöllner (Photometr. Unters., Dissert. 1859). Das gleiche Prinzip wandte Wild an in seinem zweiten Photometer (Pogg. Ann. 118, p. 193, 1863), wo er ein Savartsches Polariskop hinter die Nicols setzt und durch ein Diaphragma von dem einen Bündel nur den ordentlichen, von dem anderen nur den außerordentlichen Strahl benutzt, während er in dem ersten Photometer die Polarisation durch Spiegelung benutzt hatte (ib. 99, p. 235, 1856). Eine Vereinfachung des Apparats durch Beseitigung des Savartschen Polariskops ist von W. Müller ausgeführt (Wied. Ann. 24, p. 266, 1885) und ganz ähnlich von Wild selbst (Bull. Petersb. 11, p. 743, 1883). Die Abschwächung des stärkeren Lichtes ist auch durch Rotation von Scheiben mit schwarzen Sektoren möglich; das hat Tablot zuerst benutzt (Phil. Mag. 5, p. 327, 1834), und für Sternvergleichung haben Babinet und Secchi dasselbe getan (Arch. Genève 20, p. 121). Die Unsicherheit der Messung des Abschwächungskoeffizienten macht diese Methode sehr ungenau.

Ebenso sind die Versuche, die chemischen Wirkungen des Lichtes zu benutzen, nur bei ganz gleichartigen Lichtquellen zulässig und geben nicht ein Maß für die totale Energie. Freilich meinte Becquerel, die Unsicherheit, welche die bisherigen Photometer hatten, indem sie die eigentliche Entscheidung der Empfindlichkeit des Auges zuschoben, die doch für die verschiedenen Strahlen sehr verschieden ist, zu vermeiden, indem er die chemischen Wirkungen benutzte. Er ließ in einer lichtempfindlichen Lösung die Veränderung des Widerstandes oder der elektromotorischen Kraft an zwei gleichartigen Elektroden durch das Galvanometer nachweisen (Pogg. Ann. 54, p. 18, 1841). Dann konstruierte er sein Aktinometer, in welchem zwei mit Jodsilber bedeckte Silberplatten in Glaubersalzlösung hingen. In einem sonst dunklen Zimmer bestrahlte er die eine der Elektroden mit homogenem Licht und weißem Sonnenlicht und beobachtete am Galvanometer die Stärke des durch die Zersetzung des Jodsilbers entstehenden Stromes (ib. 55, p. 588, 1842). Daß auf solche Weise keine absolute Intensitätsmessung

möglich sei, hatte Ritter (s. oben) schon nachgewiesen. Mit photographischen Platten arbeiteten Fizeau und Foucault (C. R. 18, p. 746 u. 860, 1844); später auf dieselbe Weise Janssen (ib. 92, p. 261 u. 821, 1881). Die Wirkung auf Chlor und Wasserstoff usw. benutzte Gimé (Lum. élect. 22, p. 85, 1886). Obwohl W. Siemens nachgewiesen hat, daß die Selenzelle nicht für photometrische Zwecke mit Sicherheit zu gebrauchen ist (Wied. Ann. 2, p. 534, 1877), ist dieselbe doch benutzt von Dessendier (Lum. électr. 33, p. 407, 1889).

Nachdem Crookes im Jahre 1875 seine bekannten Lichtmühlen erfunden hatte (Radiometer, Quart. Jour. 47, p. 337, 1875), benutzte Zöllner dieses Prinzip, um darauf sein Skalenphotometer zu konstruieren, mit Flügeln von Glimmer einseitig berußt an einem Kokonfaden drehbar. Der Apparat gab gute Resultate bei diffusem Licht oder solchem Licht, wo die Wärmestrahlen sehr gering sind (Fixsterne). Die Absorption der Wärmestrahlen gelingt nicht so vollständig, daß es wirklich mechanische Lichteinheiten gibt (Das Skalen-Photometer, 1879, p. 97). Immerhin ist es das erste Photometer, welches nicht auf Vergleichung zweier Lichtquellen durch das Auge hinausläuft, sondern absolutes Maß für die Lichtstrahlung erstrebt.

Durch die meteorologisch besonders wichtige Aufgabe, die Sonnenstrahlung als Ganzes zu messen und die Absorption der Atmosphäre zu bestimmen, wurde K. Ångström 1886 veranlaßt, eine neue Methode der Messung in dem Pyrheliometer zu erfinden, welches mit Selbstregistrierung versehen war (Wied. Ann. 39, p. 294, 1890). Die Absorption war vorher schon sehr eingehend von Langley (Phil. Mag. 18, p. 289, 1884 und 26, p. 505, 1888) untersucht, von Ångström wieder aufgenommen (Wied. Ann. 36, p. 715, 1889; 39, p. 267, 1890) und spektrobolometrisch die Absorption verschiedener atmosphärischer Gase gemessen. Daselbst ist auch die Literatur über die Versuche mit einzelnen Gasen vollständig angegeben. Als ein wichtiges Resultat ergab sich dabei, daß für die Strahlungsgebiete unter 2 μ und über 5,6 μ die Absorption durch Kohlensäure nicht mehr wesentlich ist. Ångström (1857—1910) setzte seine Untersuchung fort, indem er die Strahlung verdünnter Gase unter dem Einfluß elektrischer Entladung bestimmte (ib. 48, p. 493, 1893). Darin wurde zum ersten Male die Strahlung auf absolutes Maß zurückgeführt. Von anderen Resultaten dieser Arbeit erwähne ich noch, daß das Verhältnis der Intensität der Gesamtstrahlung zu der Stromarbeit mit abnehmender Spannung des Gases stetig zunimmt, daß die Gesamtstrahlung von der molekularen Beschaffenheit des Gases abhängt, daß die Strahlung keine

reine Funktion der Temperatur ist, sondern als eine Lumineszenz im Sinne Hittorfs und E. Wiedemanns zu betrachten ist.

Die absolute Bestimmung der Wärmestrahlung verfolgte Ångström (Phys. Review 1, p. 365, 1893, cf. Wied. Ann. 67, p. 634, 1899), indem er den genialen Gedanken hatte, von zwei dünnen, nahezu gleichen, einseitig geschwärzten Metallstreifen (Platin) den einen der zu messenden Strahlung auszusetzen, während der andere durch einen Strom erwärmt wurde. Sind die Temperaturen beider Streifen gleich, so ist auch die Strahlungsenergie gleich der durch den elektrischen Strom zugeführten Energie. Ist q die Strahlung pro sec und qcm, b die Breite, a das Absorptionsvermögen, r der Widerstand der Länge 1, i die Stromstärke, so ist $b \cdot a \cdot q = \frac{r \cdot i^2}{4{,}18}$, also $q = \frac{r \cdot i^2}{4{,}18 \cdot b \cdot a}$ g/cal (sec/qcm). Um von der Gesamtstrahlung die Lichtstrahlung abzusondern, bediente sich Ångström der Alaunplatten. Er nennt den Apparat Kompensationspyrheliometer. Den gleichen Gedanken wie Ångström hatte Kurlbaum, d. h. er läßt einen Bolometerstreifen erst durch einen Strom J_1 durchlaufen, dann ist der Widerstand W_1; der Streifen wird dann bestrahlt, sein Widerstand sei W_2; dann wird die Strahlung entfernt und durch J_2 wieder der Widerstand W_2 erreicht. Die durch Strahlung erzeugte Wärmemenge ist dann $(W_2 J_2^2 - W_1 J_1^2)\, C$, wo C die thermoelektrische Konstante darstellt (Ztschr. f. Instrum. 1893, p. 122). Damit war die Grundlage für die neuere Strahlungsmessung gegeben und der Weg zur wissenschaftlich festgelegten Lichteinheit angezeigt.

Für die praktische Lichteinheit bei Photometermessungen waren von den verschiedenen Beobachtern sehr verschiedene willkürliche Einheiten gebraucht; darum war es eine Aufgabe der internationalen Konferenz in Paris 1884, eine allgemeine Einheit einzuführen: Die Einheit des weißen Lichtes ist die totale Lichtmenge, welche von einem Quadratzentimeter Oberfläche von geschmolzenem Platin bei der Erstarrungstemperatur abgegeben wird. Analog für homogenes Licht (Wied. Ann. 22, p. 616, 1884). Daß diese praktische Einheit sehr unpraktisch war, zeigte sich alsbald, als man daran ging, sie zu realisieren. Siemens nahm daher nicht geschmolzenes Platin, sondern schmelzendes (ib., p. 304). Aber auch damit ist eine wirkliche Messung schwer ausführbar, weil die Einheit verschwindet in dem Augenblick, wo sie entsteht. Man kehrte daher allgemein zu der v. Hefner-Alteneckschen Amylacetatlampe von 1883 zurück und erkannte sie auf dem Elektrikerkongreß in

Chikago 1893 als Normaleinheit an, wenn sie bei 8 mm Querschnitt des Dochtes 40 mm Flammenhöhe gibt.

Über einige Photometer, die z. T. längere Zeit benutzt wurden, ist noch nachzutragen. Zöllner hat wohl zuerst darauf hingewiesen, daß man Lichtquellen nicht einfach vergleichen könne, da sie durchweg gefärbt sind und man daher nur gleiche Spektralfarben vergleichen könne (Photom. d. Himmels, 1861, p. 1). Daraufhin hat Vierordt (Pogg. Ann. 137, p. 200, 1869) einen Apparat angegeben mit Amicischen Prismen, welcher gestattet, die Helligkeit gleicher Linien zu vergleichen. Der Apparat wurde von Glan wesentlich verbessert (Wied. Ann. 1, p. 351, 1877). Um die Feststellung der Lichtgleichheit zu erleichtern, benutzt Fuchs das Verschwinden von Interferenzstreifen, die durch zwei mit der Hypotenusenfläche bei einem kleinen Luftzwischenraum aneinander gelegte rechtwinklig gleichschenklige Prismen erzeugt werden (ib. 11, p. 465, 1880). A. König zeigte in der Sitzung der Phys. Ges. Berlin am 22. Mai 1885 sein Spektralphotometer mit einem Zwillingsprisma vor (s. Verhandl. 1885 und Wied. Ann. 53, p. 785, 1894).

In dem Spektralphotometer von Lummer und Brodhun ist der sogenannte Photometerwürfel für die Vergleichung wesentlich (Ztschr. f. Instrum. 12, p. 132, 1892). In dem zuerst konstruierten Photometer hatten Lummer und Brodhun einen weißen Papierschirm von den beiden Lichtquellen beleuchtet; von beiden Seiten wird das Licht auf zwei seitliche Spiegel reflektiert und von da auf die Kathetenflächen zweier rechtwinkliger Prismen, von denen das eine aber statt der Hypotenusenebene durch Kreiszylinder begrenzt ist, von welchem ein kleines Segment senkrecht zur Mitellinie abgeschliffen ist. Durch das dreiseitige Prisma wird das Licht total reflektiert und in ein Beobachtungsrohr geleitet. Das Licht vom zweiten Prisma geht durch die Sehnenfläche direkt (Ztschr. f. Instrum. 9, p. 41, 1889). Dann ätzten sie die Berührungsfläche mit einer Figur, so daß die feine und geätzte Fläche in Kontrastfarben erscheinen (ib.). Brücke benutzte die Totalreflexion an den Hypotenusenflächen zweier solcher Prismen direkt; die Prismen waren entweder in Platten geschnitten, die alternierend übereinander geschichtet sind mit einer gemeinsamen Kathetenfläche, oder sie waren übereinandergelegt (ib. 1890, 10. 1.).

Joly hat einen rechtwinkligen Paraffinklotz durch eine Stanniolscheibe halbiert, senkrecht zu dieser werden die Lichter aufgestellt, man beobachtet in der Ebene der Stanniolscheibe (Proc. Dublin. R. S. 4, 1885). Nach dem gleichen Prinzip ist das Photometer von

Lehmann konstruiert; auch hier wird nur diffuses Licht nach Totalreflexion in rechtwinkligen Glasprismen benutzt. Durch Beobachtung durch achromatische Linse und Vertauschung der Prismen gegen die Lichtquellen ist eine große Empfindlichkeit erreichbar (Wied. Ann. 49, p. 672, 1893). Hüfner stellt in dem Tubus einen Glasrhombus so auf, daß die scharfe horizontale Kante den Spalt gerade halbiert; durch die obere Hälfte des Spaltes wird durch Reflexionsprismen von der einen, durch das untere von der anderen Lichtquelle die Strahlung eingeführt. Nach dem Durchtritt durch den Rhombus wird der stärkere Lichtstrahl durch ein Nicol polarisiert und beide Strahlen durch ein drehbares Nicol weitergeleitet; durch die Drehung des zweiten Nicols werden beide Strahlen gleich hell gemacht (Ztschr. f. phys. Chem. 3, p. 562, 1889). Elster und Geitel konstruierten ein photoelektrisches Photometer, in welchem ein Kaliumbelag, in einem Wasserstoffvakuum von der Lichtquelle beleuchtet, stark negative Elektrizität abgibt, so daß ein lichtelektrisch erzeugter Strom entsteht. Die Stromstärke ist in weitem Maße der Beleuchtung proportional. Am besten für Ultraviolett empfindlich (Wied. Ann. 48, p. 625, 1893). Wegen der Abhängigkeit des photoelektrischen Effekts von der Wellenlänge ist dies Photometer nur für gleichartiges Licht zuverlässig, dafür aber sehr empfindlich.

Eine die ganze Photometrie und eine Reihe der erwähnten Photometer im besonderen stark beeinflussende Frage ist die, ob die Wellenlänge und damit die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von der Intensität des Lichtes irgendwie abhängt, wie J. Müller es gefunden haben wollte (Pogg. Ann. 145, p. 86, 1871). Da ist durch die sorgfältige Arbeit Eberts nachgewiesen, daß das nicht der Fall ist, indem, wenn auch die Intensität zwischen 1 und 250 variiert wird, die Wellenlänge konstant bleibt (Wied. Ann. 32, p. 337, 1887).

Chemische Wirkungen des Lichtes.

Die alltäglichen Beobachtungen, daß das Sonnenlicht bleichend wirkt, ist natürlich ganz uralt; es ist auch ebenso uralt die Erfahrung, daß solche Farbenveränderung im feuchten Zustande schneller und stärker erfolgt als im trockenen Zustande. Besonders prägnante Erfahrungen mit dem Saft eines Schalfisches des Mittelländischen Meeres hat Duhamel (1624—1706; Phil. nova et vetus in regia Burgundi, 1678) angegeben, wo sich zeigte, daß die farblose Flüssig-

keit im Sonnenlicht alsbald purpurfarben wurde; ein Zeug, mit diesem Saft getränkt, nahm rote Farbe an im Sonnenlicht, die Farbe aber erblaßte, wenn der Stoff im Dunkeln gelegen hatte.

Sorgfältiger waren die Versuche H. Schulzes (1687—1744), die nicht, wie in verschiedenen historisch sein sollenden Büchern steht, gelegentliche Bemerkungen sind. Schulze wollte den Balduinschen Phosphor (s. oben) nachmachen und suchte nach anderen Phosphoren. Er versetzte Kreide mit verschiedenen Säuren, besonders mit Scheidewasser. Als er hierbei Scheidewasser nahm, worin etwas Silber aufgelöst war und das Experiment im Sonnenlicht ausführte, sah er die Oberfläche dunkelviolett werden. Nun untersuchte er systematisch, was die Ursache sei. Reines Scheidewasser tat nichts dazu, auch nicht die Erwärmung durch die Sonnenstrahlen. Dann, als er in einem Glase die Mischung Kreide mit silberhaltigem Scheidewasser in das Sonnenlicht setzte und einen feinen Faden an dem Glase außen befestigte, blieb der von diesem Faden beschattete Teil der Mischung hell, während das übrige dunkel wurde. Er bedeckte das Glas mit Papier, in welches Buchstaben ausgeschnitten waren, und erzeugte so dunkle Schrift, die um so schwärzer wurde, je mehr Silber in dem Scheidewasser gelöst war. Die Kreide ersetzte er durch gebranntes Hirschhorn, Magnesia, Bleiweiß und andere Substanzen und stellte so fest, daß es das Silbersalz (Nitrat) sei, welches von dem Sonnenlicht zersetzt werde, und schlug vor, Erze auf diese Weise in bezug auf ihren Silbergehalt zu prüfen. (Nova acta Acad. Leop. Carol. 1727 I, p. 528.) Seine Entdeckung hat also nicht mehr Zufälligkeit an sich als viele andere große Entdeckungen, z. B. Oersteds und Röntgens usw.

Es verkleinert auch nicht das Verdienst Schulzes, daß vor ihm schon die Schwärzung der Silbersalze bekannt war, wenigstens einigen. So erwähnt Georg Fabricius, daß Hornsilber schwarz werde (De metallicis rebus, 1566) und Boyle, daß weißes Chlorsilber mit der Zeit dunkelviolett wurde (Exp. a. Cons. upon Colours. 1663), aber beide führen das auf einen Einfluß der Luft zurück und der Nachweis, daß die Lichtstrahlen hier wirksam sind, ist nirgends früher erbracht. Beccaria suchte auch nach Phosphoren und versuchte dazu auch Hornsilber, ist aber nicht so weit wie Schulze im Verständnis vorgedrungen; daß er das Silber als wesentlich erkannte; vielmehr veranlaßte er Bonzi, den Einfluß des Lichtes auf Farben zu untersuchen (Comment. Bonon. 4, p. 75, 1754). Daraufhin stellte Bonzi eine Menge gefärbte Stoffe dem Sonnen-

licht aus und fand sehr verschieden starke Wirkungen, hat aber das Verdienst, nachgewiesen zu haben, daß die Luft keine Bedeutung hierbei habe, indem er die Versuche auch im luftleeren Raume ausführte (ib. 6, p. 77, 1757). Beccaria selbst glaubte es mit einer Phosphoreszenzerscheinung zu tun zu haben (ib., p. 81). Im Verfolgen dieser Versuche fand Hellot die sympathetischen Tinten und unter diesen eine: Silberglätte in Weinessig aufgelöst, welche nicht belichtet werden durfte, ehe sie vollständig eingetrocknet war; überstrich man sie dann mit Kalkwasser, so wurde die Schrift schwarz bei Zutritt von Licht (L'art de la teinture des baines etc., 1750).

An diese Experimente schloß sich ein erbitterter Streit über das Wesen des Lichtes. Sehr viele glaubten, diese Wirkungen seien ein Beweis für die Materialität des Lichtes, nur Scherer trat dieser Auffassung entgegen und erklärte, alle die bisher bekannten chemischen Wirkungen lieferten keinen Beweis dafür (Nachträge zu den Grundzügen usw., 1796, p. 18), wobei er sich auf die mechanische Erklärung der Zuwendung der Pflanzen (Blüten) zur Sonne durch von Humboldt beruft.

Scheele (1742—1786) hat das Hornsilber dann ausführlicher untersucht (Von der Luft und dem Feuer, § 63, Ges. Werke I, p. 133, 1777) und läßt die Spektralfarben auf dasselbe wirken; da findet er, daß Violett am schnellsten die Verwandlung in Schwarz vollzieht. Bertholet zeigte dann, daß das Resultat der Lichtwirkung nicht reines Silber sei, sondern ein Teil des Chlors werde zurückgehalten (Journ. de Phys. 29, p. 86, 1786). Vasalli fand, daß auch Lampenlicht und Mondlicht die gleiche Wirkung hätten, daß dagegen starke Erwärmung im Dunkeln keinerlei Veränderung hervorruft (Crell. Chem. Ann. 2, p. 92, 1795). Zu dem Chlorsilber gesellte Vauquelin das Chromsilber und zitronensaure Silber (Ann. Chim. 25, p. 21, 1798, und Scherers Journ. d. Chem. 2, p. 717, 1798). In der Folge wurde dann die Lichtempfindlichkeit der Silbersalze, sobald ein neues entdeckt war, nachgewiesen; ich erwähne nur noch das Jodsilber durch Davy (Ann. of Phil. 1814) und Bromsilber durch Balard (Ann. de Chim. et de Phys. 32, p. 337, 1826). Zusammenfassende Darstellung der bis Scheele reichenden Versuche und Bestätigung obiger Resultate bietet Sennebier (Phys.-chem. Abh. über den Einfluß des Sonnenlichts, Tl. II u. III, 1782).

Scheele hatte die Wirkung als eine Zersetzung (Desoxydation) aufgefaßt, bei welcher Salzsäure frei werde aber Silber und Chlorsilber übrig bleibe. Berzelius stellt in seinem Lehrbuch die Sache richtig. In dem Sinne faßt auch J. W. Ritter den Vorgang auf,

aber er findet das wichtige Resultat, daß das Maximum der Reduktion auf Chlorsilber im Ultraviolett liegt (Intelligenzbl. der Erlanger Lit.-Ztg., 1801, Nr. 16, und Gilb. Ann. 7, p. 527, 1801) und untersucht dann allgemeiner die oxydierende und reduzierende Wirkung des Lichtes (ib. 12, p. 409, 1802).

Der erste, welcher ein „Bild" herstellte, war Th. Wedgwood; er legte auf mit Silbernitrat getränktes Papier Pflanzenblätter, aber er konnte das Bild nicht festhalten (Phil. Trans. 1792, und Davys Bericht, Journ. R. Inst. 1, p. 170, 1802). Lenk und Heinrich entdeckten die katalytische Wirkung von H_2O bei Zersetzung des Chlorsilbers durch Licht und die Verzögerung durch Schwefelsäure und Chlor; aber ihre Erklärung ist nicht richtig (Über d. Natur d. Lichtes, Petersburger Preisschrift 1806).

In diese Zeit fällt, wie oben auseinandergesetzt ist, die große Arbeit der Aufsuchung der drei Grundfarben. In der Richtung beschäftigte sich auch Goethe mit dem Einfluß der Farben auf die Zersetzung des Hornsilbers, ohne über Ritters Resultate hinauszukommen (Farbenlehre I, § 680, 1810). Aber darin ist ein Aufsatz von Seebeck, worin er findet, daß feuchtes Chlorsilber im farbigen Licht annähernd die Beleuchtungsfarbe annimmt und so eine farbige Photographie ermöglicht. Den Einfluß organischer Substanzen auf die Färbung von Silbernitrat hat N. W. Fischer eingehend untersucht (Über die Wirk. d. Lichts, 1814, cf. Gilb. Ann. 42, p. 90, 1812, und Kastners Arch. 9, p. 345, 1826).

Inzwischen war der Erfinder der Photographie bereits hervorgetreten; J. N. Niepce (1765—1833) fand auch Asphalt lichtempfindlich und stellte am 9. 5. 1816 auf Asphalt das erste Bild her. Er nannte den Vorgang Heliographie. Aber er fand keinen Fortschritt und verband sich darum mit dem Maler Daguerre am 14. 12. 1829. Doch auch diese Verbindung ward nicht erfolgreich. Nach Niepces Tode führte Daguerre die Untersuchung allein weiter und konnte 1838 die erste photographische Platte herstellen, dabei diente eine blanke Silberplatte, durch Joddämpfe mit einer Jodsilberhaut überzogen, zur Aufnahme. Quecksilberdämpfe hafteten an den zersetzten Stellen und erzeugten das Bild, die sogenannte Daguerréotypie (Hist. et descr. des procédés du Daguerréotyp., 1839, und Post tenebras lux etc. von J. Niepce, 1841).

Die durch Archer bewirkte Einführung des Kollodiums als Träger der Silbersalze (Liv. u. Mansch. phot. Journ. 1857, p. 121) oder des Eiweißes durch Niepce de St. Victor (C. R. 25, p. 586,

1847), der Gelatine durch Poitevin (C. R. 33, p. 647, 1850) war für die Fortbildung Daguerres von Bedeutung.

Nahezu gleichzeitig mit Daguerre trat Talbot mit seinem Verfahren an die Öffentlichkeit (Some account of the art of photogenic drawing, 1839). Ein mit Kochsalz und Silbernitrat getränktes Papier wird mit einer Mischung von Gallussäure, Essigsäure und Silbernitrat überzogen und das latente Bild in dieser Mischung entwickelt und mit Bromkalilösung fixiert. Die weitere Entwicklung der photographischen Technik übergehe ich und verweise auf die speziell der Photographie gewidmeten Werke, z. B. Eders Handbuch der Photographie, 1905.

In den schon genannten Arbeiten von Scheele, Berthollet usw. war außerdem festgestellt, daß das Licht auch anderweit großen Einfluß auf das chemische Verhalten der Körper habe, z. B. daß die gewöhnliche gelbe Salzsäure im Sonnenlicht weiß wird unter Sauerstoffabgabe, daß weiße Salpetersäure im Licht gelb wird durch Zersetzung unter Bildung roter Stickstoffdämpfe usw. Von Interesse ist eine Feststellung Robinsons, daß Licht, welches durch konzentrierte Salpetersäure gegangen war, sehr viel schwächer auf Chlorsilber wirke als das durch Wasser gegangene Sonnenlicht. Er fand damit den Energieverlust durch chemische Wirkung, der von dem durch Lichtabsorption zu trennen ist (Repert. f. Pharm. 13, p. 44, 1822). Die bis dahin gesammelten Einzelerfahrungen sind von Fiedler zusammengestellt (De lucis effectibus chemicis etc., 1835). Daß die von Draper (Phil. Mag. 1841) aufgestellten Sätze: 1. Die Lichtstrahlen wirken nur dadurch chemisch, daß sie von den lichtempfindlichen Körpern absorbiert werden, 2. Die Quantität der reflektierten chemischen Strahlen ist komplement zu den absorbierten, nicht richtig sind, hat Dr. Ascherson einwandfrei nachgewiesen (Pogg. Ann. 55, p. 467, 1842).

Eine zusammenfassende Untersuchung der photochemischen Wirkungen lieferten Bunsen und Roscoe. Sie benutzten das photochemische Verhalten des Gemisches Chlor und Wasserstoff, welches sie durch Elektrolyse von HCl gewannen. Dies Gas wurde in einem Insolationsgefäß der Bestrahlung durch eine konstante Flamme ausgesetzt und verwandelte sich in Salzsäure, welche von dem in dem Apparat befindlichen Wasser absorbiert wird. Das H_2O kann das 500fache Volumen von Salzsäure absorbieren; dadurch entsteht eine Volumenverminderung, die in einer Kapillare mit Skala abgelesen wird (Pogg. Ann. 100, p. 43, 1857). Es zeigt sich nun, daß die in der Zeiteinheit gebildete Menge HCl nicht

sofort konstant ist, sondern allmählich zu einem konstanten Werte ansteigt. Die Schnelligkeit dieses Anstiegs ist proportional der Lichtintensität und umgekehrt proportional der Masse des Gases. Diese Eigentümlichkeit nennt Bunsen die photochemische Induktion, welche nur eintritt bei Belichtung des Gemisches. Hat man die Gase vorher einzeln belichtet, so hat das auf die Dauer des Anstiegs keinen Einfluß. Bunsen faßt dies so auf, als ob das Gasgemisch dem Eintritt der Reaktion zunächst einen Widerstand entgegensetzt, der durch die Lichtstrahlen zu überwinden ist. Hebt man die Belichtung wieder auf, so stellt sich der Widerstand alsbald wieder her. Wasserstoff, Sauerstoff, Chlor, Salzsäure und nicht induziertes Gas verzögern die Wirkung. Diese Induktion zeigt sich auch bei photographischen Prozessen (ib., p. 481). Die Extinktion der chemischen Strahlen ist der Intensität proportional, man kann also für jede Substanz einen Extinktionskoeffizienten bestimmen. Es zeigt sich aber auch, daß die verschiedenen Lichtquellen verschieden wirken (ib. 101, p. 236). Mit diesem chemischen Photometer untersuchten Bunsen und Roscoe nun die Sonnenstrahlung mit Quarzlinsen und Quarzprisma, da diese das ultraviolette Licht wenig absorbieren, und maßen das ganze Spektrum durch, indem sie die Farben durch einen Spalt aussondern und das Insolationsgefäß belichten mit dem Resultat, daß von *D* bis *b* nur sehr geringe Wirkung vorhanden ist, dann steigt die Kurve stark an bis zu einem Maximum zwischen *G* und *H* in etwa einem Drittel Abstand von *G*, sinkt bis *H*, um bei *J* ein erneutes Maximum zu erreichen. Sie vergleichen auch das weiße Sonnenlicht mit dem Magnesiumblitzlicht und messen ebenfalls die Stärke des diffusen Tageslichts (ib. 108, p. 193, 1859).

Da die chemisch wirksamen Strahlen zu dem kurzwelligen Ende des Spektrums gehören, war es schwierig, das Spektrum im ganzen zu photographieren. Mascart führte das aus, indem er dasselbe in kleine Stücke abteilte und einzeln photographiert (C. R. 57, p. 789, und 58, p. 1111, 1863/64). Bei dem gleichen Versuch hatte E. Becquerel die Beobachtung gemacht, daß, wenn er eine Daguerreplatte nur kurze Zeit mit weißem Lciht beleuchtet hatte, so daß noch kein Bild entstand, diese nun geeignet war, das ganze Spektrum aufzunehmen. Das ist ein Beispiel zur Bunsenschen Induktion (La lumière, II, p. 75ff.) und meines Wissens das erste Experiment, die Sensibilität durch das Licht selbst zu erzeugen bzw. zu erhöhen. Becquerel stellte sich auch ein chemisches Photometer her, indem er zwêi mit Chlorsilber überzogene Silberplatten als Elektroden be-

nutzte; belichtete er eine der beiden, so entsteht ein Strom von ihr zur unbelichteten. Die Stromstärke wird proportional der Belichtung bei gleichmäßigen Lichtern gesetzt (ib., p. 121).

Inzwischen konstruierten Bunsen und Roscoe ihr Chlorsilberphotometer nach Herstellung eines normalen Chlorsilberpapiers und Feststellung einer Normalschwärze (Pogg. Ann. 117, p. 529, 1862). Andere Photometer sind konstruiert von Vogel für chemische Lichtstärke (ib. 134, p. 146, 1868) und von Roscoe als selbstregistrierendes Instrument für die chemischen Strahlen in der Atmosphäre (ib. 151, p. 268, 1874). Die Untersuchungen von Pringsheim über die Lichtwirkung auf Chlorknallgas (= Cl + H) haben den Vorgang für die erste Periode der Wirkung aufgeklärt und im wesentlichen Bunsens Resultate bestätigt (Wied. Ann. 32, p. 384, 1887). Durch diese Untersuchungen ist festgestellt, daß die Bezeichnung chemisch wirksame Strahlen relativ zu verstehen ist, da es auf den belichteten Körper ankommt, welche Strahlen für ihn wirksam sind.

Die Entwicklung farbiger Photographie beruht auf dem am Ende des 18. Jahrhunderts begründeten Dreifarbensystem (s. oben) und der ebenfalls schon erwähnten Entdeckung Seebecks. Wesentlich gefördert wurde dieselbe durch die Entdeckung der optischen Sensibilisatoren durch H. W. Vogel (Pogg. Ann. 153, p. 219, 1874). Aber die von ihm gefundene Übereinstimmung des Maximums für Absorption und Sensibilität ist nicht streng richtig (Wied. Ann. 28, p. 131, 1886), sondern das Absorptionsmaximum ist nach dem violetten Teil hin verschoben, wie Acworth nachgewiesen hat (ib. 42, p. 371, 1891). In demselben Jahre gelang es Lippmann, durch direkte Aufnahmen fixierbare Photographien herzustellen (Mém. Paris 1891), doch war die Wiedergabe der Farben sehr unvollkommen und nur bei Beobachtung komplizierter Vorrichtungen zu erhalten (Wied. Ann. 46, p. 426, 1892). Diese Methode arbeitet mit „stehenden Lichtwellen". Das ist eine Entdeckung von O. Wiener, die er 1884 auf der Naturforscherversammlung vorzeigte. Freilich hat Zenker in seinem Lehrbuch der Photochemie, 1868, p. 77, schon von stehenden Lichtwellen gesprochen, doch hat er deren Existenz nicht nachgewiesen. Wiener gelang der Nachweis mit einer Chlorsilberkollodiumhaut von $^1/_{20}$ bis $^1/_{40}$ von λ_0. Es stellte sich aber bei den Versuchen auch noch das für die elektromagnetische Lichttheorie wichtige Resultat ein, daß die chemische Wirkung der Lichtwelle durch die Schwingungen der elektrischen und nicht der magnetischen Kräfte bedingt ist (Wied. Ann. 40, p. 203, 1890). Wenn auch nicht in den Wienerschen Versuchen

ein bündiger Beweis für die Fresnelsche Annahme der Schwingungsrichtung des linear polarisierten Strahles gegeben ist, so ist dieselbe doch wahrscheinlich gemacht. Es mag noch erwähnt werden, daß Wiener auch die „absorptionsmäßig lichtempfindlichen Körper“ fand, welche für die Farbenphotographie von Bedeutung geworden sind.

Das Auge.

Es ist auffallend, daß Aristoteles, obwohl er den Humor aqueus, die Linse und den Humor vitreus kennt, auch sagt, daß der Sehnerv hinter diesen drei durchsichtigen Substanzen liege, doch für die Bedeutung dieser Teile gar kein Verständnis zeigt und nichts über das Zustandekommen des Sehens aussagt. Auch nach ihm ist im ganzen Altertum nach unserem Wissen nicht der geringste Versuch gemacht, die Tätigkeit des Auges zu erforschen.

Auch die Erben der Griechen haben nicht allzuviel dazu getan. Alhazen († 1038) hat ein optisches Werk hinterlassen, welches von Risner unter dem Titel: Opticae thesauros Lib. VII, 1572, herausgegeben ist in lateinischer Übersetzung. In Buch 1 findet sich die richtige Beschreibung des Auges, außer den drei Aristotelischen Körpern zählt er auf: die tunica adhaerens (sclerotica), cornea, uvea (chorioidea), retina. Das Sehen kommt so zustande, daß von jedem Punkte des gesehenen Gegenstandes Strahlen in das Auge treten und auf der „Linse“ ein Bild erzeugen; der Strahlenkegel hat den leuchtenden Punkt als Scheitel und die Pupille als Basis. Daß wir mit beiden Augen nur ein Bild des Gegenstandes sehen, kommt daher, daß die Sehnerven sich im Gehirn kreuzen. Im 3. Buche führt er eine Reihe optischer Täuschungen an, erklärt sie aber durch die Phantasie und den Verstand, während das Auge treu arbeite.

Maurolycus kennt noch nicht das Bild auf der Retina, aber sagt richtig, daß die Linse genau dieselbe Wirkung habe, wie die Glaslinsen überhaupt; da sie bikonvex sei, breche sie die Strahlen zur Achse hin. Die Weitsichtigkeit habe ihren Grund in zu geringer Krümmung, die Kurzsichtigkeit in zu großer der Linse (Photismi de lum. et umbra, 1575). G. della Porta hat die Beobachtung gemacht, daß die Pupille sich der Intensität des Lichtes entsprechend verenge und bei geringer Intensität automatisch erweitere (Magia naturalis, 17, 1589). Das Blinkern der Sterne erklärt er durch die Bewegung der Dünste in der Atmosphäre.

Wie J. Kepler der erste war, der eine wissenschaftliche Grundlage für die optischen Instrumente gab, so ist er auch der erste,

der das Auge wesentlich richtig behandelt. In Ad Vitellonem Paralipomena, 1604, c. 5, handelt er vom Sehen. Er führt die Bestandteile des Auges richtig an. Die von einem Punkte des gesehenen Gegenstandes ausgehenden Strahlen werden durch die Medien des Auges so gebrochen, daß sie sich auf der Retina schneiden, und zwar erzeugen sie dort ein kleines, umgekehrtes Bild. Bei einem kurzsichtigen Auge scheiden sie sich vor der Retina, bei weitsichtigen hinter derselben. Es ist also für verschieden weite Objekte Akkommodation nötig; hier meint er, es sei „vielleicht" möglich, daß die Linse durch den Processus ciliaris verschoben werde. In der Epitome hat er aber, wie Descartes richtig angibt (Tractatus de homine, p. 64), erklärt, daß die Linse beim Sehen nach entfernteren oder näheren Gegenständen weniger oder mehr gekrümmt werde durch den Processus ciliaris. Der leuchtende Mond erscheint größer als der dunkle bei Sonnenfinsternis wegen der Zerstreuungskreise am Rande des Bildes. Er hat also auch die Irradiation entdeckt und meint, daß sie besonders dann eintrete, wenn man nicht richtig akkommodiert habe. Auf die zahlreichen späteren irrtümlichen Erklärungen der Irradiation von Galilei bis Plateau einzugehen, ist keine Veranlassung. Die Keplersche Erklärung wurde wieder zur Geltung gebracht durch Welcker (Über Irradiation usw., 1852) und ist durch Helmholtz' (Phys. Opt., p. 394, 1896, 2. Aufl.) Erweiterung allgemein anerkannt.

Chr. Scheiner (1575—1650) erweiterte Keplers Entdeckungen, indem er die Brechungsverhältnisse der drei Medien des Auges bestimmte, das umgekehrte Bild des Objekts auf der Retina sowohl bei einem Ochsenauge wie später auch beim Menschenauge direkt zeigte und die Akkommodation mit dem bekannten „Scheinerschen Versuch" nachwies und auf die gleiche Art erklärte wie Kepler (Oculus, fundamentum opticum, 1619, p. 37). Die richtige Erklärung seines Versuches hat er freilich nicht geliefert. Diese gab erst Jacob de la Motte (Naturforsch. Ges. Danzig II, p. 209, 1754). Der entsprechende Versuch, mit einem Loche im bewegten Kartenblatt eine Bewegung des gesehenen Objekts vorzutäuschen, wurde von Mile ausgeführt (Pogg. Ann. 42, p. 40, 1837).

Eine Wiedergabe des langen Streites über die Akkommodation hat wesentlich physiologisches Interesse; ich verweise auf Helmholtz (l. c., p. 150—156), wo jedoch zu berichtigen ist, daß Scheiner (p. 151) nicht der Meinung war, daß die Verengerung der Pupille genüge zur Akkommodation.

Mariotte zerlegte menschliche und tierische Augen und fand,

daß die Eintrittsstelle des Sehnerven nicht in der Achse des Auges liege, sondern nach dem Nasenbein hin verschoben; dann zeigte er durch wiederholte Versuche, daß diese Stelle unempfindlich sei; so entdeckte er den blinden Fleck. Aber er zog daraus den Schluß, daß, weil hier die Adernhaut fehle, diese der Sitz der Lichtempfindung sein müsse (Veröffentlicht in Picard, Nouvelle découverte touchant la vue. Oeuvres 1740, p. 506 u. 516). De la Hire verwarf die Erklärung Mariottes, kam aber selbst nicht auf die richtige (Accidens de la vue, Mém. Paris 1694, p. 358ff.). In dieser Arbeit ist De la Hire (1640—1718) auch der erste, welcher die entoptischen dunklen Flecke im Gesichtsfelde erwähnt und auf lokale Fehler in den lichtbrechenden Medien und der Retina zurückführt.

Der gelbe Fleck ist erst sehr spät entdeckt von Th. Sömmering, 1796 (Journ. d. Erfind. von Michaelis 15, p. 3, und Abbild. des menschl. Auges, Frankfurt 1801) und in seiner Lage ganz richtig angegeben, aber ganz falsch gedeutet. Sömmering hat übrigens auch den dunklen „Wulst" um den gelben Fleck bereits gesehen und ebenso Wildt, nicht erst Loewe nach Haidinger (Pogg. Ann. 70, p. 403, 1847), dem die falsche Angabe gewöhnlich nachgesprochen wird (cf. Helmholtz, l. c., p. 567). Sömmering hält diese „Grube" für ein Loch in der Netzhaut. Während Michaelis sie nur für eine durchsichtige Stelle erklärt, aber Wildt-Göttingen erklärte die Sache richtig, daß hier ein Bündel der feinsten Nervenspitzen vorhanden sei, auf welche das Bild des Objekts beim Fixieren geworfen werde. Daß Sömmering usw. zu ihrer falschen Auffassung gekommen seien, habe darin seinen Grund, daß sie nur Augen von Toten untersucht hätten und im Augenblick des Todes fallen diese Nervenenden zusammen. Erst ganz allmählich hat sich die Wildtsche Erklärung durchgerungen und ist erst durch den Augenspiegel zu allgemeiner Anerkennung gekommen.

Die Nachbilder sind wohl zuerst erwähnt (nicht entdeckt!) bei Peirescius (Vita, p. 175, 1634), dann erzählt Kircher, wie er durch Bonacursius von ihrer Wirklichkeit überzeugt sei (Ars magna, 1646, p. 162). Jurin suchte die Erscheinung mit der Dauer des Lichtreizes im Auge zu erklären (Smith, Optics, Cambr. 1738, p. 170, deutsch von Kästner unter dem Titel: Lehrbuch der Optik). Sehr ausführlich handelt Buffon (1707–1788) über die komplementären Nachbilder (Mém. Paris 1743, p. 215) und erklärt die Farben durch Ermüdung der Nervenenden. Ich übergehe die große Zahl der Arbeiten, die sich mit diesen Experimenten befaßten, ohne die Erkenntnis zu fördern. Erst Fechner (1801—1887) verband die Buffonsche

Meinung der Ermüdung mit der Youngschen Farbentheorie und gab so eine befriedigende Erklärung (Pogg. Ann. 44, p. 221 u. 513; 45, p. 227, 1838), die von Helmholtz (1821—1894) weiter und sicherer ausgebildet ist (Physiol. Opt., p. 526, 1896). Die sogenannten positiven Nachbilder hängen wesentlich von der Dauer des Lichteindrucks ab.

Daß der Lichteindruck eine Zeitlang hafte, ist Newton bekannt (Optics, 1704, III, Cap. 16); aber er hat keine besonderen Messungen gemacht, er schätzt ihn auf 1″. Nach den Messungen von Segner wäre es $^1/_2$″ (De raritate luminis, 1740), während D'Arcy beim Rotieren einer glühenden Kohle den Kreis bei einer Umdrehung in 40″ geschlossen findet (Mém. Paris 1765, p. 450). Er gibt auch an, daß die Lichteindrucksdauer bei verschiedenen Menschen verschieden groß sei. Zuverlässige Messungen finden sich erst bei Emsmann (Pogg. Ann. 91, p. 611, 1854). Daß das Auge nicht achromatisch sei, ist oben schon erwähnt. Newton sah farbige Ränder, wenn er die Pupille halb verdeckte (Optics I, 2, Pr. 8). Daß Euler seine entgegengesetzte Meinung nach seiner Kontroverse mit Dollond aufgegeben habe, ist auch schon erwähnt. Aber die genaueren Messungen für das Auge setzen erst mit Fraunhofers Arbeit ein (Gilb. Ann. 56, p. 304, 1817). Doch erst durch Anwendung der dioptrischen Grundsätze von Gauss auf das Auge konnte hier vollständige Klarheit geschaffen werden. Diese Richtung der Untersuchung leitete Listing (1808—1882) ein, dessen reduziertes Auge und schematisches Auge für viele Untersuchungen normativ gewesen ist. Er führte zu den Gaussschen Hauptpunkten die Knotenpunkte ein, die eine wesentliche Erleichterung der Messungen bedingen (Beitrag zur phys. Optik, 1845, Götting. Studien, p. 7, und Wagners Handb. d. Physiol. 4, p. 451, 1851).

Die Farbenzerstreuung hat besonders behandelt Matthiessen (C. R. 24, p. 875, 1847). Alle diese Messungen bekamen eine sicherere Basis durch die Erfindung des Augenspiegels durch Helmholtz (Beschr. eines Augenspiegels usw., Berlin 1851), dessen Grundgedanke, das Auge zu erleuchten und so zu beobachten, so einfach und natürlich ist, daß man sich wundern muß, daß er nicht früher erfunden ist. Es ist darum auch ganz natürlich, daß diesem Helmholtzschen eine große Reihe anderer gefolgt sind; aber der Grundgedanke ist bei allen derselbe. In bezug auf die weiteren Untersuchungen am Auge, die wesentlich physiologisches Interesse haben, verweise ich auf Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik, wo die historischen Angaben nach den einzelnen Abschnitten angegeben sind.

4. Elektrizität und Magnetismus.

Altertum.

Aus der Zeit vor Platon haben wir nur durch spätere Zitate Kenntnis. Aus dem 4. Jahrhundert nach Christus wird in einem Orphischen Gesange gesagt, Kirke und Medea hätten mit dem Stein (natürlicher Magnet) Zauberei getrieben. Das ist natürlich wertlos, nur können wir daraus sehen, daß die Griechen die Kunde vom natürlichen Magneten in die älteste Zeit zurück verlegten (Orphei Lithica v. 311—318). Aristoteles erzählt (De anima, A. II, 405a) von Thales (627—547), daß er sich die Sache so vorgestellt habe, daß der Stein eine Seele habe, die das Eisen anziehe. Das ist oft so gedeutet, als ob Thales den Stein für beseelt gehalten habe. Das hat Aristoteles nicht damit gemeint (ib. 411a u. b), sondern aus der Erwähnung derselben Worte bei Aetius (um 100 n. Chr.) geht hervor, daß mit der Psyche hier nichts anderes gemeint ist als eine Dynamis (Kraft; Aetius I, 7 u. 11) und daß sie dasselbe bedeutet wie die Anima Keplers (Harmon. mundi, p. 110, 1619). Es soll die Immaterialität der Kraft möglichst scharf zum Ausdruck bringen.

Alexander von Aphrodisias berichtet (Quaest. nat. et mor. II, 23) von Empedokles (490—430): Durch Ausströmungen vom Magneten werden die Poren des Eisens, welche den Poren des Magnetsteins symmetrisch sind, von der sie erfüllenden Luft befreit. Dadurch wird die Ausströmung aus dem Eisen intensiv befördert und diese Ausströmungen dringen in die Poren des Magnetsteins ein und reißen das Eisen mit sich. Alexander knüpft daran die kritische Frage: Warum können nur die Ausflüsse aus dem Magnetstein die Luft aus den Poren des Eisens austreiben, und warum folgt das Eisen seinen Ausströmungen und nicht auch der Magnetstein den seinigen?

Derselbe Alexander berichtet (ib. 72 u. 28) über Demokrit (470—380): Nur Gleichartiges werde zu Gleichartigem angezogen. Die Atome des Eisens und des Magnetsteins sind gleichartig, aber die des Magnetsteins sind lockerer und leichter beweglich; darum kommen seine Ausströmungen schneller zum Eisen, dringen in die Poren und veranlassen ein stärkeres Ausströmen aus dem Eisen; diese Ausströmung findet in dem Magneten eine größere Zahl leerer Poren, in die sie eindringen kann; darum ist die Ausströmung aus dem Eisen stärker und so folgt das Eisen derselben zum Magneten. Hieran knüpft Alexander die Bemerkung: Danach müßte man

wohl annehmen, daß der Bernstein mit der Spreu und den anderen Körpern, welche er anzieht, gleichartig sei. Wenn das aber der Fall sei, so müßten diese Dinge sich auch untereinander anziehen.

Ganz ähnlich wie Demokrit drückt sich Diogenes von Apollonia aus (l. c. 73, 11, Ausg. v. Bruns), nur daß er die Ausströmung als ein Ausschwitzen feuchter Luft ansieht.

Um diese Zeit kommt zum ersten Male der Name Magnet vor in einem Zitat aus dem Dramatiker Eubulos (etwa 380) durch Athenaios (III, 78, Ausg. Schweighäuser I, p. 437). Bis dahin ist der natürliche Magnetstein entweder nur *λίθος* der Stein, oder bei Sophokles der Lydische Stein, oder auch der Herakleische Stein genannt.

Ein Fortschritt in der Erkenntnis wird erst von Platon im Dialog Ion erreicht, der freilich als unecht bezeichnet wird, aber, wenn er nicht von Platon herrührt, jedenfalls sehr bald nach Platon geschrieben ist. Da heißt es: Der Stein zieht nicht nur Eisenstückchen an, sondern erteilt ihnen die gleiche Kraft, andere Eisenstückchen anzuziehen (Ion 533), also die Entdeckung der magnetischen Induktion. Wie sich Platon die Anziehung denkt, ist in einer viel umstrittenen Stelle des Timaios (80c) gesagt. Er sagt sicher, daß es keine besondere Anziehungskraft sei, sondern (und das ist unklar ausgedrückt) das Gleichartige gehöre zusammen und deswegen zöge der Magnet das Eisen an. Diese Wesensgleichheit ist später ausdrücklich ausgesprochen, indem man dem Steine das Eigenschaftswort „eisenartig“ zusetzte (Strabon, Geogr. XV, 1, 38, p. 703). Ein chemischer Beweis dafür ist im Altertum nicht erbracht. Durch Lucretius (De rer. nat. 6, v. 906ff.) ist uns die Ansicht Epikurs entwickelt: Die Ausflüsse aus dem Magneten durchbrechen die Luft und machen so Bahnen frei, in welchen die Eisenausflüsse zum Magneten vordringen und dort in die Poren einfließen und darin haften. Das Eisenstück wird durch die heftige Bewegung mitgerissen und durch den hinter ihm wirkenden Luftdruck noch stärker angedrückt (v. 1005). Die Ausflüsse anderer Körper sind entweder zu dick oder zu zart, so daß sie entweder nicht eindringen oder nicht festsitzen können (v. 1085). Dann aber folgt, daß der Magnet seine Wirkung auch durch eine eherne Schale hindurch auf Eisenstückchen ausübt. Die Erklärung, welche Lukrez († 55 v. Chr.) dazusetzt, ist allerdings sehr töricht.

Galen fügt die Erkenntnis hinzu, daß die Fähigkeit des Steines nicht an der Oberfläche hafte, sondern durch den ganzen Stein hindurch vorhanden sei (De nat. facult. 1, 14, p. 48). Die zahl-

reichen Stellen, wo Plinius den Magneten erwähnt, sind gänzlich wertlos, so oft sie auch angeführt zu werden pflegen. Dagegen liefert Isidor (570—636 n. Chr.) die neue Entdeckung, daß das Eisen die induzierte Kraft eine längere Zeit in sich zurückhält. Er muß also auch härteres Eisen unter seinen kleinen Stücken gehabt haben, die remanenten Magnetismus besaßen. Es ist verschiedentlich behauptet, die Griechen hätten auch die Polarität gekannt. Die dazu zitierten Stellen sind durchweg falsch. Die einzige Stelle, die auf Polarität gedeutet werden kann, findet sich bei Plutarch (De Iside et Osir., c. 62), wo auch von Abstoßung der magnetischen Eisenteile die Rede ist.

Für die Elektrizität ist die Ausbeute noch geringer. Daß Thales den Bernstein als andere Körper anziehend gekannt hat, ist vielfach erwähnt (Diog. Laert. I, 24; Schol. z. Platons Staat, 600 A usw.), aber es steht nichts dabei von Reibung und auch nicht von leichten Körpern. Theophrast (etwa 312) nennt neben dem Bernstein den Lyncurion als noch stärker anziehend. Was dieser Stein gewesen ist, läßt sich nicht ermitteln; am wahrscheinlichsten unter den vielen Hypothesen scheint mir die von Watson zu sein, daß es der Turmalin gewesen sei. Alexander von Aphrodisias (l. c.) betont, daß der Bernstein nur leichte, kleine Körper anziehen könne und das nur, wenn er erwärmt sei; aber von der notwendigen Reibung ist auch hier nicht die Rede.

Im Altertum sind die elektrischen Fische weithin bekannt; Aristoteles beschreibt die Narke eingehend (De anim. hist. 505a, 2; 565, 1, 25); trotzdem hat er das elektrische Organ nicht gefunden, noch weniger hat er es mit Elektrizität zusammengebracht. Natürlich sind Gewitter und St. Elmsfeuer bekannt, aber keiner hat einen Zusammenhang mit dem geriebenen Bernstein vermutet.

Jahrhunderte sind vergangen, ehe etwas Neues gefunden wird; weder die späteren Griechen, noch Römer, noch Araber haben auf diesem Gebiete Fortschritte erzielt. Im 12. Jahrhundert taucht in Mittelmeerländern die Kenntnis des Kompasses auf in seiner rohesten Gestalt. Allein er ist hier sicher nicht erfunden und die älteste hier nachgewiesene Erwähnung desselben durch Hugue de Bercy (etwa 1190) in La Bible setzt schon eine allgemeine Kenntnis dieser Einrichtung voraus, erwähnt auch, daß ein künstlicher Magnet, durch Streichen auf einem Magnetstein erzeugt, in Form einer Nadel in ein Stück Holz oder einen Strohhalm gesteckt auf Wasser schwimmend nach Norden zeige. Schück hat es wahrscheinlich gemacht, daß schon vor 900 dieser Gebrauch den Nor-

mannen bekannt war (Arch. f. d. Gesch. d. Naturw. usw. 1910, p. 127; 1912, p. 40).

Durch J. Klaproth (Lettre à M. A. de Humboldt sur l'inv. de la bous., 1834) ist nachgewiesen, daß in China die Richtung des beweglich aufgehangenen Magnetsteins nach Norden (die Chinesen sagen nach Süden) schon vor Christi Geburt bekannt und benutzt gewesen ist. Die Jahreszahlen der chinesischen Quellen gebe ich nicht, da sie zweifellos nicht richtig sind, aber 121 n. Chr. ist der Erweis wohl zuverlässig. Diese Kenntnisse sind also von China wohl über Indien zu den Schiffern des Mittelmeeres gedrungen, ob auch zu den Normannen, kann bezweifelt werden. Da in Skandinavien der natürliche Magnetstein häufig gefunden ist, kann die Entdeckung hier selbständig gefunden sein. Da die Chinesen bereits um 200 sowohl schwimmende wie auf einer Nadelspitze oder an einem Faden schwebende künstliche Magnetnadeln gekannt haben, ist auch die Grundlage für die modernen Konstruktionen der Kompasse nicht in Europa erfunden. Ich gehe nicht näher auf die Geschichte des Kompasses ein; sie ist von Schück mit großem Fleiß zusammengetragen (Der Kompaß, 1911).

Um 1100 n. Chr. haben die Chinesen auch sicher schon die Ablenkung der Nadel von der Nordsüdlinie gekannt, wie Klaproth bereits nachwies (l. c.), während sie in Europa erst sehr viel später erkannt ist. Ein wesentlicher Fortschritt auch den Chinesen gegenüber wurde durch Petrus Peregrinus (De magnete, 1269) erzielt. Er hat einen großen Magnetstein nahezu kugelförmig abgedreht und legt nun auf die Oberfläche an verschiedenen Stellen kleine Eisenstäbchen, die sich so einstellen, daß ihre Längen Linien fixieren, die sich „wie die Meridiane der Erde" in zwei Punkten schneiden: Procul dubio omnes lineae hujus modi in duo puncta concurrunt, sicut omnes orbes mundi, quae vocantur Azimuth in duos concurrunt polos mundi oppositos (c. IV). Die magnetische Kraft der Kugel nach außen war geradeso, als ob sie in diesen beiden Polen konzentriert wäre. Auch er bestätigt den Platonschen Versuch, daß die angezogenen Eisenstücke selbst Magnete werden. Aber Peregrinus geht weiter; er findet auch die Abstoßung gleichnamiger Pole (c. VIII). Dann zerkleinert er einen Magneten und findet, daß die kleinen Teile selbst Magneten sind mit gleich gerichteter Polarität wie der Magnetstein (c. IX). Daran knüpft er dann die Theorie, daß die Magneten auf der Erdoberfläche ihren Magnetismus von dem Erdmagnetismus haben (c. X). Hier ist also zum ersten Male vom Erdmagnetismus die Rede!

Gegenüber diesen außerordentlich klaren Angaben muß es sehr überraschen, daß Porta im 7. Buche seiner Magia naturalis (1564) so mancherlei Ungereimtes vorträgt. Er gibt richtig die Methode des Streichens einer Stahlnadel an einem Pole des Steines an. Er führt den Begriff magnetischer Meridian ein und benutzt auch den magnetisierten Eisenstab zur weiteren Magnetisierung anderer Stäbe. Es wird auch angegeben, daß Porta mitgeteilt habe, daß zu seiner Zeit im Mittelländischen Meere die Magnetnadel um 9° nach Osten vom geographischen Meridian abweiche. In der mir zugänglichen Ausgabe finde ich diese Angabe nicht, jedenfalls wäre sie falsch, denn die Ablenkung betrug damals höchstens 5° im westlichen Mittelmeer. Diese Deklination ist wohl schon früher bekannt gewesen, denn von Columbus wird berichtet, daß er mit Erstaunen 1492 am 13. 9. $2^1/_2$° östlich von Corvo eine Abweichung von 0° beobachtet habe, während er in Spanien eine östliche Abweichung hatte und dann bei weiterem Fortschreiten nach Westen westliche Deklination fand (Humboldts Kosmos IV, 53).

Alfonso de Santa Cruz zeichnete 1530 die erste Deklinationskarte, oder, wie er sie nannte, Variationskarte (ib., p. 55) und Acosta gibt an, daß es nicht nur eine Nullinie gebe, sondern vier (Hist. nat. de las Indias, 1589). L. Hulsius berichtet, daß G. Hartmann (1489—1564) im Jahre 1536 in Nürnberg die Deklination zu $10^1/_2$° östlich gemessen habe, während nach Musschenbroek im Jahre 1550 Orontius Fineus in Paris dieselbe mit 8° gemessen hatte (Diss. phys. exp. de magn., 1729). Hartmann hat dann 1544 in einem Briefe an den Herzog Albrecht v. Preußen unter dem 4. März mitgeteilt, daß er auch beobachtet habe, daß die Magnetnadel sich auch mit der Nordspitze nach unten um 9° neige; also die erste Beobachtung der Inklination (Dove Rep. II, p. 130). R. Norman maß die Inklination genauer 1576 und gab 71° 50′ in London an (The new attractive, 1580). Da erschien 1600 das Werk, welches grundlegend wurde auf lange Zeit für Elektrizität und Magnetismus.

Neuzeit.

Begründung der magnetischen Wirkung.

W. Gilbert (1540—1603) hat mit seinem Werke De magnete 1600 wesentlich zur Begründung der Neuzeit in der Naturforschung beigetragen. Das Buch ist in zahlreichen Nachdrucken erschienen, gewöhnlich mit dem Zusatztitel: magneticisque corporibus et magno

magnete tellure nova physiologia, und hat mit Keplers und Galileis Werken die empirisch-induktive Methode begründet; wenn man bedenkt, daß vor ihm von Kepler nur der Prodromus, von Galilei noch nichts erschienen war, so muß man Gilbert als den eigentlichen Bahnbrecher für die Neuzeit erklären, zumal sowohl Galilei wie Kepler dies Buch verschiedentlich benutzen. Von bestimmendem Einfluß war das Buch auf Descartes, wie in der Dissertation von Frl. M. Hoppe bewiesen ist (Halle 1913). Experimentell neu sind folgende Dinge. Er untersucht die Terella (cf. Peregrinus) mit einer auf einer Stahlspitze durch Hütchen aufgehangenen Nadel, dem Versorium. Die Kraftlinien werden als Wirbel erkannt innerhalb des Magneten parallel zur Verbindungslinie der beiden Pole, dann im Bogen außerhalb durch den Orbis virtutis (das Magnetfeld) zurück zum anderen Ende. In der Äquatorebene der Terella ist kein Austritt solcher Linien. Durch Glühen geht der Magnetismus verloren. Im ganzen Magnetfelde, nicht nur bei Berührung oder Streichung an den Polen, findet Induktion statt in der durch die Kraftlinien gegebenen Richtung. Erschütterungen befördern die Magnetisierung. Solche Induktion übt auch der Erdmagnetismus aus, daher sind Eisenstäbe an Gebäuden und Gittern, eiserne Hämmer usw. nach einiger Zeit durch den Erdmagnetismus magnetisch geworden. Man kann die Wirkung eines Magneten durch Polschuhe verstärken, armierte Magnete (II, c. 17—22); denn die Kraftlinien gehen dann durch das Eisen, werden da konzentriert. Ich gebrauche das Wort Kraftlinie der kürzeren Ausdrucksweise zuliebe; Gilbert hat es noch nicht, sondern spricht von Ausströmungen. Er findet in einem Eisenring die Folgepole (III, 5), zeigt, daß zwei sich berührende Eisenstücke in der Nähe des Poles sich nicht abstoßen, sobald sie aber lose nebeneinander liegen, wegen der Abstoßung gleicher Pole divergieren. Er unterscheidet anziehende und richtende Kraft, letztere besonders durch die auf dem Wasser schwimmende Nadel, die nicht nach Norden wandert, charakterisiert. Theoretisch lehrt er effluvia und stellt sich diese, wenn auch unsichtbar, doch wohl materiell vor. Seine Bezeichnung ist eine andere wie die unsere; er nennt unsere Deklination durchweg Variation und statt Inklination sagt er Deklination. Er hat die Arbeiten von Norman gekannt. Aber Petrus Peregrinus erwähnt er hierbei nicht.

Die Entstehung des Erdmagnetismus denkt er sich als Summe über sehr viele natürliche Magnetsteine in der Erde bzw. Eisenerze in derselben, während die Erdkruste nur wenig von diesem Material

besitzt. Die Verteilung dieser Magnetsteine ist eine unregelmäßige; daraus erklärt sich, daß die Variationen so verschieden sind in oft nahe beieinander liegenden Orten. Da die Meere natürlich keine Magnetsteine enthalten, so erklärt Gilbert, für die Westküste Europas sei natürlich östliche Variation gegeben, in den Azoren, die von Afrika ebenso weit wie von Amerika seien, müsse die Variation = 0 sein, in Westindien westlich!! Aber er lehnt den Versuch, die Längenbestimmung durch die Variation zu gewinnen, den Columbus gemacht hat (A. v. Humboldt, Kosmos 4, p. 39 u. 54), ab, da die Variation sowohl auf einem Breitenkreis wie auf einem Meridian unregelmäßig ab- oder zunehme (IV, 1).

Gilbert bestätigte auch eine Beobachtung Normans, daß durch die Magnetisierung einer Nadel deren Gewicht nicht zunehme. Während er aber die Variationsbeobachtung für Längenbestimmung als ungeeignet abgewiesen hatte, glaubte er, die Inklination sei für die Breitenbestimmung durchaus zuverlässig, sie müsse am Pol 90° und am Äquator 0° betragen; in London maß er selbst 72°. Bekanntlich beobachtete Hudson im Jahre 1608 in der Hudsonbai unter 75° 22′ n. Br. die Inklination zu 89° 30′ und hielt dies für eine Bestätigung der Gilbertschen Theorie.

Nach der oben erwähnten ersten Deklinationskarte von 1530 sind verschiedene andere herausgegeben, die nicht wesentlich besser waren. Die erste, auf vielen Beobachtungen, zum Teil von ihm selbst auf den Reisen von 1698 und 1699 angestellt, beruhende Karte ist von Halley 1700 als Tabula nautica variationum herausgegeben in Mercatorprojektion und 1870 faksimiliert wieder erschienen. Für 1744 geben dann Mountaine und Dodson wieder eine solche Karte heraus und Euler zeichnete eine solche für 1760 in seinem Geographischen Atlas neu. Die erste Karte mit Kurven gleicher Inklination ist von Wilke gezeichnet. Für die Linie gleicher Deklination schlug A. v. Humboldt den Namen Isogonen vor, behielt aber die Bezeichnung Variation bei (Pogg. Ann. 15, p. 319, 1829), und für die Linien gleicher Inklination den Namen Isoklinen.

Nach Gilbert ist zunächst sehr wenig Neues gefunden; Bücher sind genug geschrieben, aber sie enthalten selten etwas mehr als in Gilberts Werk schon vorhanden war, oder geringfügige Abänderungen Gilbertscher Experimente. So gibt O. v. Guericke an, daß Eisendraht, auf einem Amboß gehämmert, magnetisch werde (Exper. nova XV); aber Gilbert hatte schon gefunden, daß man dies Hämmern ausführen müsse, wenn der Draht in der Nordsüdlinie liege oder vertikal gestellt sei; neu dagegen war, daß

die magnetischen Wirkungen auch im luftleeren Raume in gleicher Intensität beobachtet werden (ib. XVII). In Kirchers dickem Buche (Magnes usw., 1634, I, p. 6—8) ist das einzig Neue der Versuch, die Kraft eines Magneten auf der Wagschale zu messen; ferner die Tabelle der Deklinationsbeobachtungen an vielen Orten zu verschiedenen Zeiten von 1576 an, woraus er zeigt, daß die Deklination für einen Ort nicht konstant ist. Genauer wurde das nachgewiesen von Gellibrand an den Londoner Beobachtungen von 1576—1634 (A disc. math. on the var. of the mag. needle, 1635). Aus diesen Beobachtungen versuchte Bond zuerst eine Gesetzmäßigkeit der Abnahme festzustellen und somit die Deklination zu beliebiger Zeit vorauszuberechnen (Seaman's Kalend., 1650). Seine Formel ist zwar nicht richtig, aber da wir auch heute noch keine genaue Vorausberechnung machen können, ist sein Versuch doch wertvoll. Erst fast 100 Jahre später wurde durch die sorgfältige Beobachtung Grahams (1675—1751) in den Jahren 1722/23 die tägliche Variation der Deklination festgestellt (Phil. Trans. 1724).

Elektrizität.

Größer noch als die Verdienste Gilberts um die Erforschung des Magnetismus sind die um die Elektrizität. Bis dahin war sicher nur die Kenntnis der Anziehung leichter Körper an dem geriebenen Bernstein bekannt. Der Lynkurion (s. oben) war schon Plinius nicht mehr bekannt. Im 2. Buche seines genannten Werkes beschäftigt Gilbert sich mit der Elektrizität. Er gibt den Namen: Vim illam electricam nobis placet appellare (p. 54), und teilt nun die Körper in elektrische, welche durch Reiben die Fähigkeit der Anziehung bekommen, und nichtelektrische, bei welchen auch die stärkste Reibung versagt. Zur Untersuchung konstruiert er das erste Elektroskop in Form seines magnetischen Versorium, nur daß an die Stelle der Magnetnadel eine leichte Messing- oder Kupfernadel tritt. Er findet den schädlichen Einfluß der Luftfeuchtigkeit, die Zerstörung der Elektrizität in einem Körper durch die Flamme und macht auf den wesentlichen Unterschied zwischen Elektrizität und Magnetismus aufmerksam. Dort ist die Anziehung nach den Polen gerichtet, hier nach allen Punkten der Oberfläche senkrecht zur Oberfläche, die Elektrizität verliert sich, der Magnetismus nicht usw.

Gilberts Theorie ist für mehr als ein Jahrhundert maßgebend geblieben, darum müssen wir etwas bei ihr verweilen. Der Magne-

tismus besteht, wie schon erwähnt, aus Ausflüssen; das tut auch die Elektrizität, aber während erstere ganz zart und spirituell sind, sind die elektrischen Ausflüsse mehr materiell; sind sie jedoch zu massig, so sind die aussendenden Körper unelektrisch. Die Reibung veranlaßt diese Ausflüsse, stärker hervorzutreten. Die Anziehung erklärt sich durch diesen „humor" gerade so, wie zwei auf dem Wasser schwimmende Hölzer sich anziehen, wenn die herausragenden Teile feucht sind. Den Einwand, daß die Körper durch diese Ausflüsse an Gewicht verlieren müßten, will er damit abweisen, daß er auf Riechstoffe hinweist, die jahrelang ohne merklichen Gewichtsverlust ihren Duft aussenden.

Die Werke der Herren Cabeus und Kircher, welche 1629 bzw. 1634 dicke Bücher über Magnetismus und Elektrizität schrieben, enthalten nichts experimentell Neues; die theoretischen Ansichten über das Zustandekommen der Anziehung sind aber noch viel ungereimter. Dagegen hat O. von Guericke wesentlich Neues beigebracht (Experim. nova etc., 1671, IV, c. 15). Die elektrische Kraft wirkt durch einen Leinenfaden von mehr als 1 Elle Länge anziehend. Ein Glasballon von Kindskopfgröße wird mit gestoßenem Schwefel gefüllt, derselbe wird geschmolzen; ist er erkaltet, so zertrümmert Guericke das Glas, durchbohrt die Schwefelkugel, steckt eine eiserne Achse durch und legt diese in ein hölzernes Gestell. Er dreht die Achse und reibt die Kugel mit der anderen Hand. Die Kugel zieht dann leichtere Körper an, auch Wassertropfen, welche aber in größter Nähe zerstäuben; hat die Kugel die kleinen Körper zur Berührung angezogen, so stößt sie dieselben wieder ab und zieht sie nicht eher wieder an, als bis die Teilchen einen anderen Körper (die Erde, den Tisch) berührt haben (p. 147). Besonders interessant ist das Experiment mit einer Flaumfeder. Sie spreizt bei der Berührung ihre Härchen auseinander, zeigt dann bei der Abstoßung der Kugel stets die gleiche Seite, fliegt einem genäherten Körper zu und nach Berührung mit diesem wieder zur Kugel. Bei der Berührung mit dem genäherten Körper fallen die Härchen der Feder wieder schlaff herunter, ja, diese Entspannung der Feder zeigt sich schon, wenn dieselbe in die Nähe des Körpers kommt, besonders zeigt sich das, wenn dieser Körper spitz ist, z. B. ein Faden; dann kommt die Feder überhaupt nicht zur Berührung. Ebenso findet er die Entladung durch die Flamme. Hängt er über die Schwefelkugel einen Faden, so zieht dieser ebenso an wie die Kugel selbst. Beim Reiben der Schwefelkugel hört Guericke das Knistern und bei Nacht leuchtet die Kugel stellen-

weise auf (p. 149), wie wenn Zucker zerbrochen wird. Guericke hat also die Elektrisierung durch Mitteilung gefunden, die sonst Gray (1729) zugeschrieben wird; er hat die Influenz entdeckt, sonst Du Fay (1733) zugeschrieben; die Spitzenwirkung erkannt, sonst Bose (1738) oder gar Franklin (1750) zugeschrieben; das Knistern und die Funken gesehen, sonst Wall (1708) zugeschrieben. Und das alles, obwohl Gralath 1747 und Du Fay 1736 ihre Verwunderung ausdrücken, daß man an Guerickes Leistungen so schweigend vorübergegangen sei.

In bezug auf die Flamme bemerke ich noch, daß die Accademia del Cimento 1667 einen Versuch erwähnt, daß der geriebene Bernstein seine Elektrizität verliert, wenn er um eine Flamme herumgeführt wird. Eine Erklärung geben sie nicht. Da Guerickes Versuche 1661 abgeschlossen waren, ist eine Priorität für die Florentiner nicht zu behaupten (Tentamina etc. di Accad. del Cim., übersetzt von Musschenbroek, 1730, II, p. 81—92). Guericke war nicht nur in diesen Experimenten allen Zeitgenossen weit überlegen, sondern auch in seinen theoretischen Anschauungen. Er unterscheidet Materie und Kraft (p. 62). Die Virtutes sind entweder körperliche, wie der Geruch, die sich nur beschränkt ausdehnen, feste und harte Körper nicht durchdringen, oder unkörperliche, welche auch durch Körper hindurch wirken, sich mit wachsender Distanz abschwächen und schließlich die Intensität 0 bekommen. Die Ausdehnung dieser unkörperlichen Kräfte nennt er Wirkungskreis. Zu ihnen gehört die Virtus impulsiva (Zentrifugalkraft), die Virtus conservativa (die Anziehung der Erde), die Virtus directiva (Magnetismus) usw. Diese Virtutes wirken ohne Zuhilfenahme eines Mediums (p. 125). Er lehrt also ein agere in distans. Auch die Elektrizität ist eine unkörperliche Kraft, und zwar conservativa. Die Anwendung seiner Ansichten über Elektrizität und Magnetismus auf das Planetensystem können wir übergehen; aber er erklärt (p. 178), der Sonne ein magnetisches Moment zuschreiben zu müssen. Um Guerickes Verdienste voll einzuschätzen, lese man die phantastischen Bücher seiner Zeitgenossen K. Digby (1664, Demonstratio immortalitatis animae, p. 217) oder H. Fabri (Physica etc., p. 212, 1669—1671). Auch Newtons Beschäftigung mit Elektrizität ist nicht fruchtbar. In dem berühmten Briefe vom 9. Dez. 1675 teilt er auch ein elektrisches Experiment mit; der Brief ist erst veröffentlicht durch Birch (The Hist. of R. S. III, p. 250, 1757). Er überdeckt einen auf der Tischplatte liegenden Messingring mit einer Glasplatte; auf dem Tische liegen kleine

Papierschnitzel. Er reibt die Glasplatte, die Schnitzel richten sich auf und fallen nach Berührung mit der Glasplatte wieder auf den Tisch usw. Er erklärt dies auffallenderweise so: In der Glasplatte ist eine Art feiner Masse (aethereal spirit), die durch das Reiben verdünnt wird und die Glasplatte in wirbelartiger Bewegung umschwebt, dadurch die Papierschnitzel aufreißt und zur Glasplatte führt. Das Urbild unseres bekannten niedlichen Kinderspielzeugs! Ob Newton auch das Leuchten gesehen hat, ist zweifelhaft. Erst in der von Clarke besorgten Ausgabe der Optice 1740 findet sich (p. 272) das Experiment, daß eine mit der Hand geriebene Glaskugel bei schneller Rotation leuchtet. In der ersten Ausgabe 1706 fehlt dieser Absatz; es kann sein, daß der Zusatz von Clarke in Wiederholung des Hawksbeeschen Experiments (s. unten) herrührt.

R. Boyle hat wesentlich frühere Versuche nachgemacht (The Phil. Works etc., II. Ed. 1738, I, p. 506). Theoretisch steht er auf der Annahme recht materieller Effluvia aus den elektrischen Körpern, seine Versuche mit der Flaumfeder, die ihm von englischen Schriftstellern als besondere Leistungen gebucht werden, sind ohne Namensnennung identische Wiederholungen von Guerickes Experimenten. Wenn sie auch vor 1672, dem Jahre der Guerickeschen Publikation angestellt sind, ist doch erwiesen, daß Boyle Guerickes Versuche gekannt hat. Moncony war 1663 bei Guericke (Exper. nova p. 150), sah die Experimente und beschrieb sie (Journ. des Vog. 1665, übers. von Junkern, Leipzig 1697, p. 546), teilte sie Morrey schon früher mit und Morrey schreibt am 17. 8. 1664 an Moncony: „Herr Boyle hat Euren Brief gesehen und mit mehrerer Satisfaktion, als ihr nicht glauben werdet, gelesen" (l. c., p. 513). Aber zwei Versuche Boyles sind neu: Trockene Haare werden durch Reiben mit der Hand stark elektrisch, und die Anziehung des geriebenen Bernsteins findet auch im luftleeren Raume statt.

Das Reiben des Bernsteins führte Dr. Wall zu weiteren Entdeckungen. Der Knopf seines Handstockes war Bernstein; im Dunkeln mit der Hand gerieben, leuchtete derselbe bisweilen auf. Er verschafft sich nun ein großes Stück Bernstein, findet, daß es, mit Wolle gerieben, knistert und aufleuchtet; dann nähert er den Finger dem geriebenen Bernstein und sieht den Funken mit großem Knall überspringen: „A large crackling is produced with a great flash of Light." Ebenso fühlt er den „elektrischen Wind". Je größer das Stück Bernstein sei, um so größer der Funken: „and it seems, in some degree, to represent Thunder and Lightning"

(Phil. Trans. 1708, p. 69). Hier ist zum ersten Male die Idee ausgesprochen, daß der Blitz eine elektrische Entladung sei. Wall erzeugt den gleichen Effekt auch mit geriebenem Siegellack.

Um diese Zeit sind auch die ersten Beobachtungen gemacht über die Ent- und Ummagnetisierung der Kompaßnadel durch einen Blitzschlag (Phil. Trans. 1676, p. 647, und 1684, p. 520), ebenso die erste Beobachtung des von Lord Stanhope 1779 so genannten und von P. Ries (Reibungselektr. I, p. 178) richtig erklärten Rückschlages (Phil. Trans. 1698, p. 5).

Die ausgedehnten und fruchtbaren Versuche Hawksbees († 1713) schließen an die oben erwähnten Beobachtungen Picards (Journ. des Scav. 1676, p. 126) über leuchtende Barometer an. Er zeigt durch Versuche unter dem Rezipienten der Luftpumpe, daß die Reibung des Quecksilbers an Glas in dem luftverdünnten Raume einen Lichtschein (Body of Fire) erzeugt (Phil. Trans. 1705, p. 2129, Nr. 303), der fahl erscheint und ausgedehnt (diffus) ist, so daß man keine Richtung angeben kann. Er stellt sich eine Rotationsmaschine her und läßt dadurch in einem Rezipienten verschiedene Körper von wollenem Reibzeug reiben, erzeugt auch hier Licht, aber von anderer Farbe als beim Quecksilber. Er stellt fest, daß eine evakuierte Glasröhre, mit der Hand oder mit Wolle gerieben, im Innern einen rötlichen Lichtschein zeigt, wesentlich verschieden von den Funken, die aus der äußeren Oberfläche der geriebenen Glasröhre gezogen werden können (ib. 1706, p. 2277 u. 2327). Ist die Röhre nicht evakuiert, so kann er nur Funken aus der äußeren Fläche ziehen. Er zeigt an diesen Röhren, daß sie auch anziehend wirken, daß sie also elektrisch geworden sind. Bei seinen Versuchen mit dem Rezipienten hat Hawksbee auch als der erste eine Stopfbüchse aus Messing mit Lederpackung gebraucht (ib. 1705, p. 2165), die bald nachher in der Wattschen Dampfmaschine Verwendung fand. Durch eine Reihe von Versuchen zeigt er, daß die Elektrizität nur auf der Oberfläche verteilt ist (ib. 1707, p. 2372). Dabei findet er Experimente, die ihm den Unterschied zwischen Leiter und Nichtleiter hätten zeigen müssen; aber seine Anschauung entsprechend der effluvia Gilberts hindert ihn, diese Unterscheidung zu treffen.

An einer komplizierten Maschine, wo er einen evakuierten Glasbehälter in einem anderen drehen kann, wie auch den äußeren, findet er die Influenzelektrizität und nennt sie auch so (ib. 1707, p. 2313, richtiger 2413). Dann macht er die analogen Versuche auch mit Siegellack, Schwefel, Kolophonium und Pech (ib. 1708,

p. 219, 391, 441); er wiederholt auch den Newtonschen Versuch und zeigt dabei den Einfluß der Luftfeuchtigkeit (ib., p. 82). Bei seinen Versuchen mit Pech stellt Hawksbee endlich auch fest, daß dasselbe nach Erkalten in der Glasschale ohne Reibung auch Elektrizität auf der Oberfläche zeigte (Phys. mech. Exper. 1709, p. 99). Ein Versuch, der von Gray mit Harz 1731 und Du Fay mit Schwefel 1733 wiederholt wurde. Von Wilke erhielt diese Elektrizitätserzeugung den Namen freiwillige Elektrizität (1777, Abhandl. d. Schwed. Akad.). Die ausführliche Darstellung dieses Abschnittes der Elektrizitätslehre einschließlich vollständiger Literatur habe ich 1887 gegeben (Programm d. Joh., Hamburg 1887).

Stephan Gray (1670—1736) berichtet über seine seit 1729 ausgeführten Versuche der R. S. (Phil. Trans. 1731, p. 18, 227, 285). Er hat die Versuche O. v. Guerickes mit der Flaumfeder und der geriebenen Glasstange wiederholt und an dem Faden eine Metallkugel hängen lassen, die dann eine stärkere Anziehung ausübt. Bei dem Wunsche, den Bindfaden länger zu machen, bemerkt er, daß der Versuch mißlingt, wenn er den Faden über einen Nagel an der Decke des Zimmers leitet. Sein Freund Wehler rät ihm, Seidenschnur zur Aufhängung zu wählen, und nun gelingt es ihm, die Elektrizität durch einen 666′ langen Bindfaden zu einer Kugel zu leiten (3. Juli 1729). Er hing statt der Kugel einen 47pfündigen Knaben an Haarschnüren auf, näherte ihm eine geriebene Glasstande und fand die Influenzelektrizität (p. 39). Er stellte den Knaben dann auf einen Harzkuchen mit gleichem Erfolg (ib. 1735, p. 166); er unterscheidet nun Leiter und Nichtleiter. Erstere können nur isoliert durch Berührung oder durch Influenz elektrisch gemacht werden, letztere werden durch Reiben elektrisch. Er zeigt, daß so auch Flüssigkeiten (Wasser) elektrisiert werden können (ib. 1732, p. 227), findet die Entladung durch Berührung mit dem Finger, unterscheidet das aus Spitzen ausströmende Büschellicht von dem elektrischen Funken (ib. 1735, p. 166) und beweist, daß nicht die Masse des Körpers, sondern die Oberfläche das Entscheidende für die Menge der Elektrizität ist (ib. 1732, p. 35). W. Thomson sagt in seiner Geschichte der R. S., p. 432, von Gray: „Es ist wunderbar, daß keine biographischen Notizen auf uns gekommen sind über einen Mann, dem die Elektrizität so viel verdankt.“

Nahezu gleichzeitig arbeitete in Frankreich Du Fay (1698 bis 1739) seit 1733 (Mém. Paris, p. 23). Er wiederholt Guerickes Versuche und erweitert Grays Entdeckung: Alle Nichtleiter können

durch Reiben elektrisch werden in verschieden starkem Grade, wahrscheinlich auch Metalle, doch leiten sie die erzeugte Elektrizität sofort ab (p. 73). Die Leitung ist unbegrenzt; er hat bis 1256′ dieselbe verfolgt bei trockenem Wetter. Leiter sind neben den Metallen auch die animalischen Körper wegen ihres Flüssigkeitsgehaltes. Er zieht aus dem isolierten Knaben Funken (p. 252), zur größten Bestürzung der Akademiker. Doch schon Johann Bernoulli hatte aus einer vom Schwanz nach dem Kopfe hin geriebenen Katze Funken gezogen (Hist. Paris 1707). Er ersetzt den Grayschen Harzkuchen durch den Isolierschemel. Bei seinen Versuchen über Influenz gebraucht er zum ersten Male die Abstoßung zweier Blättchen von unechtem Goldschaum (p. 464), die sich bei Annäherung der geriebenen Glasstange abstoßen. Er stellt die Leitfähigkeit der Flamme fest und entlädt mit ihr elektrisierte Körper. Er verbessert das Gilbertsche Versorium, indem er die Balance isoliert und nicht in eine Spitze auslaufen, sondern stumpf sein läßt. Er bringt an das eine Ende der Balance einen Kopal an, reibt diesen und zeigt, daß das Ende mit dem Kopal von einem anderen Kopal oder einer geriebenen Hartgummistange abgestoßen, dagegen von einer geriebenen Glasstange angezogen wird (ib. 1733, p. 468). Die weitere Verfolgung dieses Versuches führt ihn zur Unterscheidung der Glas- und Harzelektrizität (Phil. Trans. 1734, p. 263): „There are two distinct Electricitys very different from one another, one which I call vitreous and the other resinous Electricity.“ Dann teilt er die elektrischen Körper diesen beiden Gruppen zu. Die späteren Arbeiten (Mém. 1737, p. 80 u. 307) enthalten nichts Bedeutendes, z. T. Falsches.

Bei den zahlreichen Versuchen von Desagulier (1683—1744) sind nur neu die Bemerkung, daß auch die Nichtleiter lokal begrenzt auf der Oberfläche durch Berührung Elektrizität erhalten und, wenn sie geladen, ebenso lokal durch Berührung entladen werden können; und die andere, daß eine isolierte Flamme nach Ausblasen den Docht elektrisch zurückläßt (Phil. Trans. 1739, p. 186).

Elektrisiermaschine.

Hausen (1693—1743) wurde durch seinen Zuhörer Litzendorf darauf aufmerksam gemacht, daß man das Reiben der Glaskugel oder Röhre bequemer nach Art der Guerickeschen Einrichtung machen könne; so versah er die Maschine mit Schwungrad und Schnurlauf, welcher die Glaskugel, die mit der Hand gerieben wurde,

in schnelle Rotation versetzt (Novi profectus in Hist. electric., 1743). Dieser Maschine fügte Bose (1710—1761) den Konduktor hinzu, indem er eine Blechröhre, an einem Ende geschlossen, am anderen mit einem Büschel Hanffäden versehen, welche die geriebene Glaskugel nahezu berührten, an seidenen Schnüren aufhing. Mit solcher Maschine erhielt er bereits so starke Funken, daß er zuerst Schießpulver damit entzünden und „Menschen umwerfen" konnte (Elektr. nach ihrer Entd. u. Fortgang, II, 1742). Leider wurde Bose später in der Fortsetzung seiner Arbeiten gestört, indem die Preußen ihn nach Plünderung seiner Wohnung in Wittenberg nach Magdeburg schleppten, wo er in den Kasematten gestorben ist. Bis dahin war mit der Hand gerieben. Winkler (1703—1770) führte mit dem Mechaniker Giessing das Reibzeug, ein mit Pferdehaaren gestopftes Lederkissen, bei der Maschine ein und fand auch, daß die Maschine am besten arbeitete, wenn er das Reibzeug berührte oder durch leitende Säule mit der Erde verband (Gedank. v. d. Eigensch. usw. d. Elektr., 1744, p. 12). Diese Maschine lieferte ihm so starke Funken, daß er damit Schwefeläther, Kampferspiritus usw. entzünden konnte. Ludolf führte diesen Versuch bei der feierlichen Wiedereröffnung der Berliner Akademie vor (Mém. Berlin 1744).

Zur Verbesserung des Reibzeuges bestrich Waitz (Abhandl. v. d. Elektr., 1745, c. 2) das Kissen mit Wachs und Öl. Canton nahm zuerst Quecksilberamalgam, und zwar reines Zinnamalgam (Phil. Trans. 1762, p. 461). Doch war dies aus mehreren Gründen auf die Dauer unangenehm. Ebensowenig Erfolg hatte das Zinkamalgam von Higgins (Phil. Trans. 1778, p. 861). Dagegen hat das Amalgam des Wiener Appellationsrates v. Kienmayer, welches aus Zinn, Zink und Quecksilber im Verhältnis 1 : 1 : 2 bestand, viele Jahrzehnte allein Beachtung gefunden (Journ. d. Phys. 1788, Août) und die moderne Verbesserung Pfisters unterscheidet sich von dem alten Kienmayerschen nur durch einen geringfügigen Zusatz von kohlensaurem Kalk (Rieß, Reibungselektr. I, p. 291, 1853). Das Reibkissen mit einem Stück Wachstaffet zu versehen, schlug Nooth vor (Phil. Trans. 1763, Nr. 35, cf. Journ. d. Phys. 1789, p. 274), während Nairne einen Seidenlappen daran befestigte (vgl. Cavallo, A comp. Treat. on Elec., deutsch 1797, p. 146).

Statt der Glaszylindermaschine Winklers schlug der Haldensteinsche Seminardirektor Planta 1755 vor, Glasscheiben zu verwenden, die von zwei sich gegenüberstehenden Kisten gerieben wurden und an der anderen Seite zwischen zwei Kämmen, die vom Konduktor ausgingen, durchlaufen (Allg. deutsch. Bib., Anhang z.

13./14. Bd., I, p. 549). Derselbe Vorschlag wurde wiederholt ohne Nennung des Planta von Sigaud de la Fond (Précis hist. et exper. des Phénom. elect. 1781, I, p. 298) und von Ingenhousz 1787 (Priestley, Geschichte, 2. Aufl., p. 350). Die Plantasche Erfindung ist dann in großen Dimensionen von Toaldo ausgeführt und seitdem allgemein verbreitet (Hist. Berl. 1781, p. 30). Das großartigste Exemplar dieser Scheibenmaschine war das v. Marums (1750—1837) für das Teyler Museum (Beschr. ein. ung. groß. Elektrisiermaschine, 1786), welche mit ihren vier Reibkissen und zwei Konduktoren zu vielen wertvollen Versuchen gedient hat (s. unten); v. Marum hatte schon vorher Versuche gemacht, die bis in die neueste Zeit Nachahmung gefunden haben. Statt der Glasscheibe benutzt er auch Hartgummischeiben usw., statt der Reibkissen läßt er die Glasscheiben zur Hälfte in Quecksilbertrögen laufen usw. (Abhandl. über d. Elektrisieren, deutsch 1777). Die Maschinen mit Hartgummi, Harz usw. sollten dazu dienen, negative Elektrizität zur Verfügung zu haben, und sind von Volta 1771 bis Lichtenberg 1786 vielfach gebaut, aber Priestley (1733—1804) hatte schon darauf aufmerksam gemacht, daß man das Reibzeug nur zu isolieren brauche und den Konduktor ableiten müsse, um ebensoviel negative als vorher positive Elektrizität zur Verfügung zu haben (Geschichte, p. 339 u. 360).

Das Prinzip der Influenz ist wohl zum ersten Male von dem Italiener Belli 1831 angewandt in einer recht unbeholfenen Einrichtung, die von Wiedemann umständlich beschrieben ist (s. Lehre von der Elektr. II, p. 196), doch erst durch Töpler (1836—1912, Pogg. Ann. 125, p. 469, 1865) und durch Holtz (1836—1913, ib. 126, p. 157, 1865, und 127, p. 320, 1866) sind die Influenzmaschinen geschaffen, welche dauernd gebraucht werden. Die Theorie derselben ist von Rieß (1804—1883) ausführlich gegeben (ib. 131, p. 215, 1867, und 140, p. 168, 276, 562, 1870). Die Holtzsche Maschine ist dann zu einer Doppelmaschine ausgebildet (ib. 141, p. 185, 1870, und 145, p. 1, 1872). Die Glasscheiben sind ersetzt durch Ebonitscheiben von Schlösser (ib. 156, p. 496, 1875) und haben sich trotz des anfänglichen Widerstandes mehrerer Forscher bald durchgesetzt.

Für kurze Zeit hat auch eine Dampfelektrisiermaschine eine Rolle gespielt. Die Vorgeschichte derselben geht bis auf Franklin zurück. In seinem 4. Briefe an P. Collinson 1749, 7. Nov., teilt Franklin mit, daß stark elektrisiertes Wasser schnell verdunste, das gleiche behauptet Nollet von allen Flüssigkeiten (Rech. s. l. causes etc., 1749, p. 327). Daraus schließt Franklin,

daß das verdunstende Wasser seine Elektrizität mitnimmt; seine daraus abgeleitete Gewittertheorie hat er bald nachher selbst aufgegeben. Obwohl Kinnersley beobachtet hatte, daß ruhig aufsteigender Dampf auch von elektrisiertem Wasser unelektrisch sei (Phil. Trans. 1763, p. 85), eine Beobachtung, die 1881 im Helmholtzschen Institut bestätigt wurde, desgleichen von Sohncke (Wied. Ann. 34, p. 925, 1888), hielt doch Franklin und andere an der Meinung fest, daß die Verdampfung eine Quelle der Elektrizität sei, besonders, als Lavoisier und Laplace gefunden hatten, daß das in einem Metallgefäß verdunstende Wasser stets —, der Dampf stets + sei (Phil. Trans. 1782, p. 274). Volta fand gleiche Elektrizitätserregung beim Aufspritzen von Wasser auf eine glühende Kohle und Gardini wollte gesehen haben, daß Verdampfung auf rotglühendem rostigen Eisen —-Dampf, auf glattem +-Dampf erzeuge (Dissert. d. nat. ign. 1792, p. 124). Sehr ausführlich sind diese Fragen von Pouillet untersucht (Pogg. Ann. 11, p. 417, 1827; Ann. de Chim. et de Phys. 35, p. 401; C. R. II, p. 908, 1835). Bei chemisch reinem Wasser fand er keine Elektrizität, dagegen bei Lösungen und oxydierbaren Gefäßen. Auch Peltier kommt zu dem Resultat, daß beim Auflösen salziger Lösungen durch Verdampfen Elektrizität erzeugt werde (Ann. de Chim. et de Phys. 75, p. 330, 1840). Reich und Rieß geben die Ursache als Reibung des Dampfes an festen Körpern an (Reibungselektr. II, p. 407). Inzwischen war durch eine gelegentliche Beobachtung eines Maschinenwärters 1840 Armstrong zu der Überzeugung gekommen, daß aus dem Sicherheitsventil ausströmender Dampf +, die Maschine — elektrisch sei, wenn letztere isoliert aufgestellt war (aus Phil. Mag. in Pogg. Ann. 52, p. 328, und 53, p. 313, 1841) und gab die Reibung des Dampfes an dem Ventil als Ursache an. Faraday untersuchte die Sache genauer und meinte, daß die sich im Dampfe schon bildenden oder mitgerissenen Wassertropfen durch Reibung an dem Auffangkamm die Elektrizität erzeugten (Exper. resear. S. 18; Pogg. Ann. 60, p. 321, 1843). Die daraufhin konstruierte Dampfelektrisiermaschine Armstrongs hat keine große Verbreitung gefunden.

Verstärkungsflaschen.

Durch den Abbé Nollet hat die Verstärkungsflasche irrtümlicherweise die Etikette „Leidener Flasche" bekommen (Mém. Paris 1746, p. 1 u. 447), während der Erfinder in Kamin in Pommern wohnte; die ausführliche Geschichte der Erfindung ist von mir festgestellt

(Gesch. d. Elektr., 1884, p. 18ff.). Prälat von Kleist wollte Elektrizität in eine Flasche leiten und nahm am 10. Okt. 1745 ein Medizinfläschchen, steckte einen Nagel hinein und hielt den Kopf desselben an den Konduktor der Elektrisiermaschine; berührte er nun den Kopf nach Abnahme vom Konduktor mit der anderen Hand, so bekam er einen Schlag. Als er in das Glas Wasser oder Quecksilber goß, wurde der Schlag außerordentlich heftig. Im November teilte er diese Entdeckung dem Mitgliede der Akademie in Berlin Lieberkühn mit und dieser zeigte alsbald den Versuch in der Akademie vor (Hist. Berl. 1745). Desgleichen kam v. Kleists Bericht nach Danzig, wo Bürgermeister Gralath (1708—1767) umfangreiche Versuche über die Bedingungen für die Ladung anstellte und zum ersten Male eine Batterie zusammenstellte (Ver. u. Abh. der naturw. Ges. Danzig I, p. 442). Durch Vermittlung von Krüger in Halle erfuhr Winkler in Leipzig diese Entdeckung. Seine Veröffentlichung (D. elektr. Kraft d. Wassers in gläs. Gef., 1746) verbreitete die Kenntnis über die Verstärkungsflaschen weit früher als die Pariser Veröffentlichung, die erst 1751 erschien. Winkler erkannte die Notwendigkeit der innigen Berührung des Leiters mit der Oberfläche des Glases und nahm für den inneren Leiter Wasser, belegte aber die äußere Oberfläche mit einer anschließenden Metallhülle, für welche Bevis Zinnfolie nahm, und Watson dehnte diese Zinnfoliebelegung auch auf die Innenbelegung aus (Phil. Trans. 1748, p. 60). Winkler war es auch, der zuerst den Rückstand der Flaschen entdeckte und nahezu richtig erklärte (l. c., p. 39) vom Standpunkte der Du Fayschen Theorie aus.

Dieser Du Fayschen Theorie stellte Franklin (1706—1790) schon in seinem 2. Briefe an Collinson (Exper., p. 8) seine unitarische Theorie gegenüber. Er geht aus von dem schon von Watson gemachten Experiment: Ein auf Isolierschemel stehender Mensch reibt eine Glasstange, zieht aus ihr nun Funken und erscheint dann doch unelektrisch, während ein anderer isoliert stehender Mensch durch den Funken elektrisiert wird. Seine Theorie ist am präzisesten von dem Übersetzer seiner Briefe Wilke (1758, Vorrede) so ausgesprochen: Durch die ganze körperliche Natur ist eine feine Materie verbreitet, deren Teile sich abstoßen, aber die Teile der Materie anziehen; hat ein Körper so viel dieser Elektrizität angezogen, als er in sich, ohne Anhäufung auf der Oberfläche, enthalten kann, so ist er neutral, hat er mehr, so ist er plus, weniger, so minus elektrisch. Mit dieser Theorie will Franklin die Verstärkungsflaschen erklären, nimmt aber statt der Flaschen nun auf beiden Seiten mit

Zinnfolie drei Viertel belegte Glastafel, wie sie von Smeaton zuerst hergestellt waren (Experiments etc., p. 29). Es ist komisch, daß auch hier die Tafel in der elektrischen Literatur nicht nach dem Erfinder genannt wird, sondern als Franklinsche Tafel, obgleich Franklin selbst (l. c.) sagt, daß sie von Smeaton erfunden sei. Diese Erklärung hatte den Übelstand, daß sie konsequenterweise dazu führen mußte, zu fordern, daß die unelektrischen Körper einander abstoßen müßten, entgegen der Newtonschen Gravitation.

Aepinus (1724—1802) versuchte, die Schwierigkeit zu heben (Tentamen theor. Elect., 1759, p. 36), allein die Versuche Wilkes (Abh. Stockh. 1758, deutsch von Kästner, p. 241), sowie die von beiden ausgeführten Versuche mit der sogenannten „Lufttafel" zeigten ihnen, daß eine ausreichende Erklärung vom Standpunkt der unitarischen Theorie nicht möglich sei (De electr. contrariis, p. 96, 1759). Dabei machte Aepinus die feine Bemerkung, man könne nicht Leiter und Nichtleiter unterscheiden, sondern nur den Widerstand, welchen die Körper der Leitung der Elektrizität entgegensetzen, bestimmen; der könne zwischen den Grenzen 0 und ∞ alle Werte annehmen.

Für die Erklärung der Tafel aber ist die Wilkesche Arbeit von größter Bedeutung. Er beschäftigt sich (l. c., p. 265) mit dem Zustand des Isolators, der Glasplatte oder der Luft, und sagt, daß die Moleküle des Isolators an den entgegengesetzten Enden mit entgegengesetzter Elektrizität geladen seien und so in dem Isolator durch die Ladung der Metallfläche alternierend + und — geladene Schichten entständen. Er hat also schon 1758 die dielektrische Polarisation entdeckt (nicht erst Faraday). Ausführlicher ist dieser Polarisationszustand dann von ihm 1762 untersucht (ib. 24, p. 218, 1762), wobei er sich bereits der dualistischen Auffassung nähert. Denn inzwischen waren von R. Symmer an seinen Seidenstrümpfen Experimente gemacht, welche ihm mit der Franklinschen Theorie unverträglich erschienen, und er stellte die Du Faysche Theorie wieder her (Phil. Trans. 1759, p. 340 u. 371). Für diese beiden Elektrizitäten führte Lichtenberg dann die Bezeichnung positiv und negativ ein (Comm. Göttingen 1778, p. 69) und dabei ist es bis heute geblieben.

Dieser Theorie bedient sich Wilke dann ganz konsequent in der großen Arbeit (Hand. Stockholm 38, p. 73, 1777), in welcher er nicht nur die Tafel untersucht, sondern auch nachweist, daß der von Volta erfundene Elektrophor (Scel. d. op. Milano 8 u. 9, 1775) nichts anderes ist als eine andere Anordnung für die Tafel. Er geht

denn auch zur Erklärung der Influenz über, die er ebenfalls ganz in derselben Weise liefert wie später Faraday durch Vermittlung des Dielektrikums. Auch die verschiedenen Isolatoren, Glas, Harz, Luft, untersucht Wilke, und findet, daß sie sich nur durch die schnellere oder trägere Fortpflanzung unterscheiden. Die Spitzenwirkung erklärt Wilke ebenso wie Faraday durch Konvektion; die von Faraday gezeichneten krummen elektrischen Kraftlinien zwischen den geladenen und influenzierten Körpern hat Wilke bereits sichtbar gemacht und zeigt, daß diese krummen Wege die Resultanten der in der Luft vorhandenen elektrischen Spannungen sind. Ich stelle die besonders sich entsprechenden Abschnitte dieser Wilkeschen Arbeit nach Paragraphen und die Nummern aus Faradays Exper. Researches zusammen, wobei auch die Anordnung der Experimente sich in weitgehendem Maße entspricht: § 19 ∼ 1245, § 25 ∼ 1246, § 29 ∼ 1298, § 26 ∼ 1686, § 35 ∼ 1278 und 1298, § 34 ∼ 1375, § 36 ∼ 1562—1569, § 41 ∼ 1371, § 43 ∼ 1371, § 42 ∼ 1304, § 45 ∼ 1252. Dieser letzte Abschnitt der Faradayschen Untersuchung fügt neu hinzu den Begriff der „spezifischen Induktionskapazität". Da Faraday (1781 bis 1867) das isolierende Medium bereits Dielektrikum genannt hat (1168), so ist es sehr begreiflich, daß diese Kapazität, da sie ja das Medium charakterisiert, in der auf diese Wilkeschen Anschauung aufgebauten Theorie W. Thomsons (1824—1907), die den Nachweis liefert, daß man alle bis dahin als Fernwirkung aufgefaßten Erscheinungen auch so erklären kann, den Namen Dielektrizitätskonstante erhalten hat, und durch Maxwell überall eingebürgert ist (Electr. and Magn. I, § 104ff., 1873). Die damit einsetzende neuere Periode wird unten weiterbehandelt.

Geschwindigkeit der Elektrizität.

Die Nachahmung der Winklerschen Beobachtungen mit den Verstärkungsflaschen durch den Arzt Le Monnier, welcher die Flasche durch einen Eisendraht von 1900 Toisen Länge entlud, führten ihn zu dem Versuch, die Geschwindigkeit der Elektrizität zu messen; allein er konnte nur feststellen, daß die Entladung durch einen solchen Draht weniger als $^1/_4$″ Zeit beanspruche (Phil. Trans. 1746, p. 290, und Mém. Paris 1746, p. 447). Darauf bat die R. S. ihr Mitglied Watson (1715—1787), die Versuche in größerem Maßstabe zu wiederholen. Er fand, daß die Ausbreitung zwar nicht instantan sei, aber die Geschwindigkeit unmeßbar (Phil. Trans. 1748, p. 49).

Erst Wheatstone (1802—1875) machte neue Versuche, indem er eine Verstärkungsflasche durch einen 2640′ langen Draht entlud, der in der Mitte durchschnitten war. Alle vier Enden liefen in Kugeln aus, die in gerader Linie nebeneinandergestellt waren; er verband die beiden äußeren mit der inneren und äußeren Belegung, so daß hier und in der Mitte drei Funken übersprangen. Diese beobachtete er in einem rotierenden Spiegel und berechnete aus der Verschiebung des mittleren Bildes gegen die beiden anderen, daß für die 1320′ eine Zeit von 0,000000868″ erforderlich sei, d. h. die Geschwindigkeit hätte sich zu 62500 Meilen ergeben (Phil. Trans. 1834, p. 583). Er hatte auch auf ähnliche Weise die Dauer eines Funkens bei Entladung der Flasche zu $0{,}42'' \cdot 10^{-4}$ bestimmt. Beide Werte sind sehr unzulänglich.

W. Weber (1804—1891) war gezwungen, die Konstante seines Gesetzes zu bestimmen; c stellte nach der Formel die relative Geschwindigkeit dar, bei welcher zwei elektrische Teilchen gar keine Wirkung aufeinander ausüben. Dies war zu berechnen, wenn das Verhältnis bestimmt wurde zwischen der Elektrizitätsmenge, die durch den Querschnitt des Leiters in einer Sekunde fließt, wenn der Strom einer Tangentenbussole mit dem Radius R in einfachem Kreise der Nadel eine Ablenkung $\varphi = \operatorname{arctang} \frac{2\pi}{R \cdot T}$ gibt, wo T die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus ist, und der Elektrizitätsmenge auf jeder von zwei kleinen Kugeln, welche sich in der Einheit der Entfernung mit der Einheit der Kraft abstoßen. Weber und R. Kohlrausch führten diese Messungen aus und fanden $c =$ etwa 439 Millionen Meter p. Sek. (Abhandl. Leipzig 5, p. 264, 1857) und demnach die Geschwindigkeit der Elektrizitätsfortpflanzung = 41949 geogr. Meilen. Aus Bradleys Beobachtungen hatte Busch für die Lichtgeschwindigkeit 41994 gefunden und Fizeau maß 41882. Da sich bald herausstellte, daß die Theorie der Elektrizität die Identität der beiden Geschwindigkeiten forderte, war dieser Nachweis besonders wertvoll.

Spannungsmessungen.

Die Meßversuche Gilberts, Guerickes usw. sind schon besprochen. Um die Mitte des 18. Jahrhunderts trat durch die großen Fortschritte der Elektrizitätslehre das Bedürfnis hervor, die Stärke der Ladungen zu messen. Waitz hing an Seidenfäden zwei kleine Metallplatten auf und wollte aus der Größe der Ablenkung und dem Gewicht die Stärke messen (Abhandl. v. d. Elektr., Berlin

1745, p. 45). Ebenfalls die Gravitation wollten Ellicot (Phil. Trans. 1747) und Gralath (Abhandl. Danzig I) anwenden, indem sie die Anziehung einer Wagschale durch den elektrischen Körper mit Gewichten in der anderen Wagschale bestimmten. Nollet (1700—1770) dagegen hing zwei sich berührende Fäden an einer Glasstange auf und beobachtete das durch eine Lampe entworfene Schattenbild auf einem Schirme, die Größe des gemessenen Winkels war ihm das Maß der Elektrizität. Wohl der erste Versuch der Projektion auf einen Schirm (Mém. Paris 1747, p. 102). Canton (1718—1772) schlug zur Messung der Ladung einer Verstärkungsflasche vor, die Funkenentladung bei bestimmter Distanz zu benutzen (Phil. Trans. 1748). Daraus ging die Lanesche Maßflasche hervor, bei welcher die Distanz der äußeren Kugel von dem Knauf der inneren Belegung durch eine Mikrometerschraube gemessen wurde (Phil. Trans. 1767, p. 451). Der lange Zeit gebrauchte Apparat hatte nur den Übelstand, daß die zu messende Ladung durch die Messung selbst vernichtet wurde.

Holundermarkkugeln wandte Canton zuerst an, aufgehangen an seidenen Schnüren oder an Leinenfäden, beim Messen am Konduktor der Maschine (Phil. Trans. 48, p. 350, 1758). Henley hat (ib. 1772) zuerst das Elektroskop mit dem Elfenbeinbogen am unteren Ende einer vertikalen Messingstange, an deren Spitze ein leicht beweglicher Holzstab herabhing und durch seine Abstoßung von der Stange den Winkel an dem Bogen angab, konstruiert. Dies Quadrantelektroskop ist dann von Saxtorph in die Form gebracht, die auch viel verbreitet war, an die Stelle des Holzstabes setzt er einen Strohhalm mit einer kleinen Meerschaumkugel, bringt den Quadranten oben an und steckt in den Strohhalm eine feine Glasspitze, die auf dem Bogen spielt. Das erste Elektroskop in einem Glasgefäß mit einer zur Erde abgeleiteten Streifenbelegung war das Voltas 1781, bei welchem zwei Strohhalme von einem im Deckel befestigten Messingknauf herabhingen. Der Winkel wurde an einer außen angebrachten Papierskala gemessen (Opera Firenze 1816, I, 2, p. 8).

Mit der Form des Voltaschen Apparats verband Cavallo seine Aufhängung der feinen Metallfäden mit kleinen Holundermarkkugeln (Phil. Trans. 70, p. 21, 1780) und Saussure führte die gleiche Idee in einem größeren Glasballon aus (Voyage d. l. Alpes II, p. 194). Endlich ersetzte Bennet (1750—1799) die Strohhalme und Metallfäden durch zwei schmale Goldblattstreifen, wie wir es noch heute kennen (Phil. Trans. 1787, p. 52).

In derselben Arbeit hat Bennet der R. S. auch vorgeschlagen, für luftelektrische Messungen auf den Knauf des Elektroskops eine Flamme zu setzen, wodurch die Empfindlichkeit außerordentlich erhöht werde. Die Einrichtung ist mehr als 100 Jahre in Kew beibehalten. Von Bennet wurde mit dem Goldblattelektroskop auch sein Duplikator verbunden. Die Readsche Anordnung (Journ. d. Phys. 45, p. 468, 1794) ist nur eine geringfügige Abänderung. Dieser Bennetsche Duplikator (Phil. Trans. 1787, p. 288) ist aus dem Voltaschen Kondensator hervorgegangen, der aus zwei durch eine dünne isolierende Schicht (Firnis, Harz) getrennten Metallplatten, die eine auf festem Isolator, die andere beweglich an isolierendem Handgriff, bestand (Phil. Trans. 1782, p. 242 u. 257).

Das Duplikationsverfahren ist zuerst von Lichtenberg (1744 bis 1799) mit zwei Harzkuchen ausgeführt (Journ. d. Rozier 1780, p. 20); er ersetzte auch den Firnis des Kondensators, der durch fast unvermeidliche Reibung leicht störend wirkt, durch drei winzig kleine Glassplitter oder drei kleinste Siegellacktropfen, so daß der Isolator eine dünne Luftschicht ist (Anfangsgründe 1794, p. 506). Die Theorie dieser Apparate ist von Rieß (I, p. 307—341) ausführlich auseinandergesetzt. Doch erst durch den Gedanken, die Ladung des Kondensators mit galvanischer Elektrizität zu machen, gelangte W. Siemens zu einwandfreien Messungen (Pogg. Ann. 102, p. 66, 1857). Daraufhin hat dann Clausius die Theorie der belegten Tafel und des Kondensators gegeben (Abhandl. II, p. 135). Von Maxwell ist eine allgemeine Theorie schon früher aufgestellt (Phil. Trans. 155, I, p. 459) und von Helmholtz abschließend (Borch. Journ. 72, p. 57, 1870) durchgeführt. Dieser Weg mündet dann in die elektromagnetische Lichttheorie aus (s. unten). Die zahlreichen Elektroskope, die nur ephemere Bedeutung gehabt haben, übergehe ich hier und verweise auf meine ausführlichere Geschichte der Elektrizität. Aber neben dieser Reihe, die zum Goldblattelektroskop gehört, gibt es eine zweite, die wohl noch wichtiger geworden ist.

Coulomb (1736—1806) kam von seiner Untersuchung über den Kompaß 1779 zur Untersuchung der Torsionskraft eines belasteten Fadens (Mém. Paris 1784, p. 229). Er führte darin den Torsionskoeffizienten ein und vergleicht die Torsionskraft mit der Schwerkraft. Dadurch bestimmt er den Torsionskoeffizienten für verschiedene Metalldrähte und findet hier bereits, daß dieselben mit der Zeit variabel sind, indem ein frei hängender Metalldraht sich dauernd langsam nach einer Seite dreht, darum die Ruhelage

immer wieder neu bestimmt werden muß. Diese Drehung ist besonders von Reich untersucht (Neue Vers. mit d. Drehwage, 1852, p. 406). Für gedrehte Seidenfäden weist Gauss nach, daß der Torsionskoeffizient mit dem spannenden Gewicht veränderlich ist (Inten. vis mag. ter. 1833, § 9, Werke 5, p. 94). Einwandfrei ist der einfache Kokonfaden, der wegen seiner geringen Festigkeit später durch Glas und noch besser durch Quarzfäden ersetzt ist. Darauf konstruiert Coulomb die „elektrische Balance" (Mém. Paris 1785, p. 569) mit Silberfadenaufhängung und untersucht zunächst die Abstoßung zweier gleich großer Kugeln. Resultat: Die abstoßende Kraft zweier kleiner gleichartig elektrischer Kugeln ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung der Mittelpunkte. In einer folgenden Arbeit behandelt er die Anziehung und spricht das Gesetz sowohl für Anziehung wie Abstoßung, auch für elektrische Moleküle aus $k = a \frac{e \cdot e'}{r^2}$ (l. c., p. 611).

Die Engländer erwähnen oft, daß Priestley (1733—1804) das Gesetz für Anziehung schon früher, 1767, ausgesprochen habe. In der Tat steht in seiner Geschichte (deutsche Ausgabe, p. 489): „Könnte man aus diesen Experimenten nicht folgern, daß das Anziehen der Elektrizität einerlei Gesetzen mit der Schwerkraft unterworfen sei und sich mithin nach den Quadraten der Distanzen richte?" Allein er gibt gar keine Versuche an, woraus er das hätte schließen können, sondern hat nur von den längst bekannten Anziehungen gesprochen. Dieser Ausspruch ist also sicher nichts anderes als ein Wunsch, daß es so sein möge wegen der Analogie mit dem Gravitationsgesetz; zweifellos haben sehr viele diesen frommen Wunsch gehabt, aber es fehlte der Nachweis. Aber Priestley war gar nicht der erste, welcher derartige Ansichten hatte. Für die magnetische Anziehung und Abstoßung hat Michell (1724—1793) auf Grund der Beobachtungen von Musschenbroek das Gesetz $m \cdot m^1/r^2$ ausgesprochen (A treatise of Artificial Magnets, 1750, p. 17). Unabhängig hiervon fand Tob. Mayer (1723—1762) für magnetische Attraktion dasselbe Gesetz (Göttinger gel. Anz. 1760) und ebenso Lambert (1728—1777) durch Ablenkung der Magnetnadel (Hist. Berlin 1766, p. 22). Für elektrische Anziehung und Abstoßung hat Daniel Bernoulli schon vor 1760 dies Gesetz abgeleitet aus Versuchen mit einem Elektrometer, welches dem von Le Roy und d'Arcy (s. unten) entspricht. Über diese Versuche berichtet Socinus (Acta Helvetica 1760, 4, p. 214, spez. 224) und sagt in bezug auf die Anziehung: eique visum est, in ratione

reciproca quadrata distantiarum id fieri, si vis electricitatis maneat eadem. Er fügt hinzu, der berühmte Mann sei so mit Geschäften überhäuft, daß er die Erfindung noch nicht habe mit sicheren Experimenten vollenden können. Auch Cavendish (1731 bis 1810) hat das Coulombsche Gesetz als ein wahrscheinliches ausgesprochen in einer Arbeit, die auch sonst wertvoll ist (Phil. Trans. 61, p. 584, 1771). Er hat da die Ladung eines Kondensators gemessen mit dem primitiven Nolletschen Elektrometer und außerordentlich gute Resultate bekommen. Er führt den Begriff der elektrostatischen Kapazität ein mit dem Namen „globular inches" und gebraucht ihn, da er auf dem Standpunkt der Wilkeschen Theorie vom isolierenden Medium steht, für die von Faraday so genannte „spezifische induktive Kapazität". Wegen dieser Vorzüge hat Maxwell die Cavendishschen Elect. Res. 1879 gesammelt herausgegeben (s. p. 478ff.).

Coulomb wendet sich den die Beobachtung störenden Elektrizitätsverlusten zu (ib., p. 612). Das gleiche Thema hatte Achard behandelt und auch den Verlust durch die Luft von dem Verlust durch die Stützen unterschieden, auch für ersteren den Einfluß der Luftfeuchtigkeit festgestellt, allein keine präzise Angabe gefunden (Mém. Berlin 1777, p. 25). Coulomb beantwortet die Frage analytisch und experimentell. Im folgenden Jahre untersucht Coulomb die Verteilung der Elektrizität auf der Oberfläche. Daß die Elektrizität auf der Oberfläche sich verteile, hatte schon Waitz mit dem noch heute in Sammlungen vorhandenen Drahtnetz in Form einer Glocke nachzuweisen versucht (Abhandl. v. d. Elektr. 1745, p. 38). Coulomb benutzt nun die „Probekugel" und führt die alternierende Messung ein, bei schwachen Ladungen dreifach bei starken fünffach. Die Versuche bestätigen durchaus die Theorie (Mém. Paris 1786, p. 67; 1787, p. 426; 1788, p. 620). In der letzten Arbeit gibt er auch den Apparat an, der in den Fabrikkatalogen noch heute paradiert: die isolierte Messingkugel mit den abnehmbaren Halbkugeln. Wichtiger ist, daß Coulomb in der zweiten Arbeit (p. 578) die Methode der Oszillation unter dem Einfluß der elektrischen Kugel, also die Oszillationsdauer im elektrischen Felde zum ersten Male zur Messung der Intensität anwendet.

Über das Coulombsche Gesetz wird unten gehandelt. Zunächst die Weiterbildung des Meßapparats. Geraume Zeit nach Erfindung der Drehwage wird auf diesem Prinzip versucht, Elektrometer zu bauen; zuerst von Dellmann, der nur ganz geringfügige Änderungen anbrachte (Pogg. Ann. 53, p. 606, 1841). Gleichzeitig führte

Oersted, der zur Aufhängung einen Kokonfaden benutzte, neben der Torsion eine schwache magnetische Richtkraft ein, indem er einen dünnen Messingdraht als Wagebalken durch eine kurze eiserne Öse an dem Faden aufhängt und nun die Abstoßung nicht durch Kugeln, sondern durch radiale Messingstreifen bewirkt (ib., p. 612). Der Apparat war sehr viel empfindlicher als der von Peltier eingeführte, wo ein mit einem kleinen Magnet versehener Wagebalken auf einer Spitze balanciert (Ann. de Chim. et de Phys. 62, p. 422, 1836). Durch Oersted angeregt, konstruierte Dellmann dann sein bekanntes Elektrometer, bei welchem der Magnetismus wieder ausgeschaltet ist und die ablenkenden Radien von unten geladen werden (Pogg. Ann. 55, p. 301, 1842; 58, p. 49, 1843). Verbesserung dieses Apparates rührte von Romershausen (ib. 69, p. 71, 1846) und besonders von R. Kohlrausch (ib. 72, p. 358, 1847) her. Er wandte zuerst Glasfaden für den Kokonfaden an, der durch seine lange elastische Nachwirkung störend wirkt; er macht den Wagebalken vertikal verstellbar, um ihn nach Belieben laden zu können. Der Apparat ist luftdicht gebaut, um Strömungen zu vermeiden, und mit konzentrierter Schwefelsäure von Feuchtigkeit befreit. Kohlrausch beobachtete mit dem Apparat auch nach anderer Methode als Dellmann es getan hatte. Er stellte den Wagebalken senkrecht zu dem ladenden Bügel, drehte nach Ladung den Faden oben in der Aufhängung um einen Winkel α, dann stellte sich der Wagebalken in den Winkel β zu dem Bügel für diese Ladung λ, gab er dann eine zweite Ladung λ', so mußte er, um die gleiche Ablenkung β zu bekommen, den Faden um α' drehen; dann besteht die Gleichung: $\lambda^2 : \lambda'^2 = (\alpha + \beta) : (\alpha' + \beta)$.

An das Peltiersche Elektrometer schließt sich das Rießsche Elektrometer (Pogg. Ann. 96, p. 513, 1855), welches als Sinuselektrometer bezeichnet wird, weil bei der Methode sich die Elektrizitätsladungen wie die Quadratwurzeln aus den Sinus der Ablenkungswinkel verhalten. Von großem Einfluß auf die weitere Elektrometerkonstruktion war das Quadrantelektrometer von W. Thomson (Rep. Brit. Assoc. 1855, p. 22), das in mehrfachen Verbesserungen dann zum absoluten Elektrometer umgestaltet wurde (Phil. Mag. 20, p. 253, 1860). Das Wesentliche an dem Apparat ist, daß in der in vier voneinander isolierten Quadranten geteilten flachen Metallkapsel ein als Oktant ausgeschnittenes Scheibchen schwingt, an einem äußerst feinen Draht aufgehängt, durch welchen diese „Nadel" geladen wird. Man kann dann die Quadranten einzeln und in verschiedenen Kombinationen laden

und hat bei geeigneter Wahl des Materials eine außerordentliche Empfindlichkeit. Die Ablenkung wird mit der Poggendorffschen Spiegelablesung gemessen. Andererseits kann man den Apparat auch für hohe Spannungen einrichten, wie z. B. in dem Instrument von Hallwachs (Wied. Ann. 29, p. 300, 1886) oder Gouy (C. R. 110, p. 1125, 1890), in der Einrichtung von Thomson (Rep. of Papers on Electr., 1870, p. 277), in der Ausführung von Righi (Rend. d. Bologna 7, p. 193, 1876) und Quincke (Wied. Ann. 19, p. 564, 1883). Durch Eintauchen einer kleinen, an der Verlängerung des Aufhängefadens befestigten Platte in Schwefelsäure kann man die Schwingungen dämpfen und gleichzeitig die Luftfeuchtigkeit beseitigen. Durch Reduktion der Metallkapsel auf Metallscheiben, über welchen die „Nadel" schwingt, kann man die Empfindlichkeit wesentlich herabdrücken (s. Angot, Ann. de l'École norm. 3, p. 253, 1874). Die Variationen dieses Elektrometerprinzips reichen bis in die neueste Zeit. Die Theorie der Messung ist ausführlich begründet von Maxwell (Electr. 1, p. 273, 1873) und Hallwachs (Wied. Ann. 29, p. 1, 1886).

Ein wesentlich anderes Prinzip liegt dem Elektrometer von Le Roy und d'Arcy zugrunde. Ein Aräometer ragt mit seinem Stiele durch eine als Deckel dienende Messingscheibe; an dem Stiele ist eine zweite verstellbare Scheibe; sie wird so eingestellt, daß sie die erstere gerade berührt; elektrisiert man den Deckel, so wird die Scheibe von ihm abgestoßen, das Aräometer hebt sich und so kann die Spannung gemessen werden (Mém. Paris 1749, p. 63). Daß dies mit vielen Fehlerquellen behaftete Prinzip dann von Snow Harris (Phil. Trans. 1834) und gar von Michelson (Wied. Ann. 34, p. 1038, 1888) wieder ausgegraben ist, wird etwas wunderbar erscheinen; aber man hoffte wohl, so die absolute Messung bequem ausführen zu können. Bald nachdem die Voltasche Säule bekannt geworden war, konstruierte Behrens (1775—1813) die sogenannte trockene Säule aus Zink und Goldpapier (Gilb. Ann. 23, p. 1, 1806). Die Versuche mit dieser trockenen Säule zeigten ihm die lange Konstanz der Ladung; er konstruierte daher zwei solche Säulen, stellte sie mit entgegengesetzten Polen nach oben unter eine Glasglocke; von der Mitte des Deckels hing ein schmales Goldschaumblatt herunter, das an einem herausragenden Knaufe befestigt war. Die Pole der Säulen armierte er mit zwei kleinen, versilberten Messingplatten, welche einander genähert werden konnten. Zwischen den Platten hing das Goldblatt (ib., p. 25). Ganz ähnlich war die Einrichtung Delucs, nur nahm er statt zweier Säulen eine

einzige, die dann horizontal gelegt war (Bib. Brit. 47, p. 213, 1811). Als dann Zamboni eine ebensolche Säule baute und sie ebenfalls für ein Elektrometer verwandte, wo er aber nicht ein Goldblättchen zwischen den Messingplatten hängen ließ, sondern eine seitlich auf einer Spitze schwingende Metallnadel mit einem Ende zwischen die Platten brachte, beeilten sich besonders deutsche Gelehrte, von einem Zambonischen Säulenelektroskop zu sprechen (Della pila elet. a secco, 1812). Die von Zamboni wirklich erfundene Säule sieht ganz anders aus. Er nahm 30 mit Wasser gefüllte Uhrgläser, legte zwischen je zwei einen Stanniolstreifen, dessen rechte Seite breit, dessen linke spitz war, dann fand er am breiten Ende der zusammengestellten Säule +-, an der spitzen Seite —-Elektrizität (Gilb. Ann. 60, p. 170, 1818). Dieselbe Säule wurde von Watkins noch einmal „entdeckt“ (Pogg. Ann. 14, p. 386, 1828).

Erman hatte schon 1807 nachgewiesen, daß die Behrenssche Säule tatsächlich nicht eine trockene sei, da der hygroskopische Charakter des Papiers bewirke, daß die Luftfeuchtigkeit stets zwischen den Metallen Leitung herstelle (Gilb. Ann. 25, p. 8, 1807). Man findet das Behrenssche Elektrometer nicht nur unter der Bezeichnung Zambonisches, sondern auch Bohnenbergersches, obwohl auch er ganz unschuldig ist an dem Prinzip dieses Apparates (Gilb. Ann. 53, p. 346, 1816). Erst Hankel hat dem Apparat eine andere Gestalt gegeben, indem er den eigentlichen Meßapparat, d. h. die beiden Elektroden und das Goldschaumblatt, in einen besonderen Apparat trennt von der Säule. Den Elektroden wird von den Polen einer Hochspannungssäule durch feine Drähte die Ladung zugeführt und die Bewegung des mit dem zu untersuchenden Körper in Verbindung stehenden Goldblattes wird durch eine zusammengesetzte Lupe beobachtet oder auf eine Skala projiziert (Pogg. Ann. 84, p. 28, 1850). Über Kapillarelektrometer s. unten.

Luft- und Gewitterelektrizität.

Franklins große Popularität beruhte wesentlich auf dem Nachweis, daß das Gewitter eine elektrische Erscheinung sei, und auf der Erfindung des Blitzableiters, so daß d'Alembert ihn bei der feierlichen Begrüßung in der Akademie zu Paris 1783 mit dem Verse feiern konnte: eripuit coelo fulmen, sceptrumque tyrannis! Oben habe ich über die Spitzenwirkung schon berichtet, auch über die ersten Äußerungen über die elektrische Natur des Gewitters; aber es fehlte an einem Beweise. Winkler hatte schon 1746 versucht,

durch Analogie zwischen Blitz und Entladungsfunken der Verstärkungsflaschen die elektrische Natur des Blitzes plausibel zu machen. Er hatte zuerst auf die Tatsache aufmerksam gemacht, daß häufiger beobachtet sei, daß Metalle in schlecht leitender Umhüllung (Leder) durch den Blitz geschmolzen werden, ohne daß das Leder Spuren des Blitzes nachwies; damit sei die Meinung, daß der Blitz Feuer sei, widerlegt. Er gibt auch eine mögliche Quelle der Wolkenelektrizität an, nämlich die Reibung des verdunstenden Wassers an der Erdoberfläche (Die Stärke d. elektr. Kraft d. Wassers, 1746, p. 137). Diese Vorstellung Winklers übernimmt Franklin und will auch das Wetterleuchten auf diese Weise elektrisch erklären. Damit verband Franklin seine Beobachtungen über die Spitzenwirkung im 2. und 3. Briefe an Collinson (Obs. on Electr., p. 59), wobei er nicht nur das Ausströmen der Elektrizität aus der an einem geladenen Konduktor angebrachten Spitze zeigt, sondern auch die Entladung eines isolierten Konduktors durch eine mit der Erde verbundene genäherte Spitze, was zuerst v. Guericke (s. oben) schon beobachtet hatte.

Das gibt ihm Veranlassung, in dem Briefe vom 29. 7. 1750 (l. c., p. 65) vorzuschlagen, auf den höchsten Punkten der Häuser und den Masten der Schiffe Stangen mit vergoldeter Spitze anzubringen, diese durch einen an der Außenseite der Häuser hinabgehenden starken Draht mit dem Erdboden oder dem Wasser zu verbinden; dadurch würde die Wolkenelektrizität abgeleitet, ehe die Spannung zu einem Entladungsschlage ausreiche. Aber weder Franklin noch ein anderer hat diesen Vorschlag damals ausgeführt.

Um die elektrische Natur der Wolken zu untersuchen, schlägt Franklin dann vor, man solle auf freiem Platze ein Schilderhaus aufstellen mit einem Isolierschemel, darauf solle der Beobachter treten und eine spitze Stange aus dem Häuschen herausstrecken, so kann man aus dem Menschen, wenn eine elektrische Wolke vorüberzieht, einen Funken ziehen; oder man kann die Stange isoliert befestigen und am unteren Ende eine größere Kugel, woraus dann der Funken zu ziehen sei. Das Experiment wurde zuerst am 10. 5. 1752 von d'Alibard in Marly ausgeführt (ib., p. 106), während Franklin selbst einen mit Spitze und Leitung versehenen Drachen steigen ließ, um die Wolkenelektrizität zu erforschen (ib., p. 111). An seiner Wetterstange beobachtete Franklin mit dem von Gordon erfundenen Glockenspiel (Phen. electr. expos. 1741, p. 43), welches ihn zur Beobachtung heranrief, sobald eine Ladung der

Kugel vorhanden war; damit stellte er zum ersten Male fest, daß die Wolken auch negativ elektrisch sein können (ib, p. 117). Das widersprach seiner Theorie, darum gab er sie selbst sofcrf auf.

Diese gefährliche Versuchsanordnung forderte am 6. 8. 1753 den Tod des Petersburger Professors Richmann und wurde dann aufgegeben, nachdem Cassini entdeckt hatte, daß auch bei wolkenlosem Himmel in der Versuchsstange Elektrizität zu finden war (Mém. Paris 1752, p. 10) und Le Monnier (der Arzt) festgestellt hatte, daß die Luft stets elektrisch sei, daß sie aber bald +, bald — war (ib., p. 241). Nun nahm Winkler den Franklinschen Gedanken, Blitzableiter zu bauen, wieder auf (De fulminis artificio, 1753). Doch hatte er eine abweichende Konstruktion. Er leitete vom Fuß der Stange den Draht vom Hause fort zu einem großen Metallknopf, der dem Kugelende einer tief in die Erde getriebenen eisernen Stange dicht gegenübersteht, so daß zwischen diesen beiden Kugeln, sobald eine bedeutendere Ladung vorhanden ist, fortgesetzt kleine Funken überspringen. Nach dieser Vorschrift ist dann der erste Blitzableiter von Procopius Divisch 1754 in Znaim in Mähren errichtet (Euler, Briefe an eine deutsche Prinzessin, II, p. 227, 1763).

Franklin ließ die beiden Kugeln fort und nahm die ursprünglichen Vorschläge wieder auf. Die daraufhin in England 1762 von Watson errichteten Blitzableiter sind also ohne Funkenstrecke. In der Roy. Soc. entbrannte dann ein Streit zwischen Wilson und Watson, ob man nicht statt der Spitzen Kugeln am oberen Ende anbringen müsse; doch siegte dabei die durch Nairne verteidigte Spitze (Phil. Trans. 1777/78). Hierüber schrieb auch Reimarus mehrere Abhandlungen und errichtete 1769 in Hamburg den ersten Blitzableiter in Deutschland auf dem Jakobiturm. In mehreren Schriften hat Reimarus den Nachweis geliefert, daß die spitzen Blitzableiter notwendig sind, und dadurch wesentlich zur allgemeinen Einführung beigetragen. Die weiteren Untersuchungen über Luftelektrizität, sowie die Gewittertheorien gehören in das Gebiet der Meteorologie.

Aber über die Spitzenwirkung ist noch einiges nachzutragen. Gordon hatte bereits 1741 (Phen. elect., p. 45) das elektrische Flugrad konstruiert und gebrauchte dasselbe als Elektroskop beim Konduktor der Elektrisiermaschine. Canton und Franklin hatten dasselbe nach der unitarischen Theorie zu erklären versucht und gemeint, es funktioniere nur, wenn es mit +-Elektrizität geladen werde. Wilke untersuchte dasselbe, fand, daß es bei —-Ladung

ebenso sicher rotiere, zeigte, daß auch der elektrische Wind von beiden Elektrizitäten erzeugt werde und erklärte die Wirkung durch Konvektion (Abhandl. Stockholm 25, p. 207, 1763). Er ist dabei der erste, welcher das Glimmlicht und das Büschellicht unterscheidet. In Übereinstimmung mit dieser Erklärung zeigte Cigna, daß die Rotation aufhört, sobald die Umgebung vollständig geladen ist. Er stellte das Rad in einen isolierten Metallkessel; ist die Wandung geladen, so hört die Rotation auf (Miscel. Soc. Taur. 5, p. 97). Cavallo brachte das Rad zum Stillstand, wenn er es in den Rezipienten einer Luftpumpe stellte und stark evakuierte (Treat. of Electr. 1795, I, p. 296).

Nordlicht.

Daß auch das Nordlicht eine elektrische Erscheinung sei, ist zuerst von Winkler (l. c. 1746, § 146) ausgesprochen. Bekannt ist die Erscheinung auch schon im Altertum gewesen, aber bis auf Halley ist nichts Vernünftiges darüber gesagt. Das große Nordlicht von 1716, welches in ganz Europa bis nach Unteritalien beobachtet wurde, gab Halley Veranlassung, festzustellen, daß die Achse des dunklen Segments im magnetischen Meridian liege (Phil. Trans. 1716, Nr. 374) und er meinte, es sei ein magnetischer Ausfluß aus dem Pol. Mairan meinte, das Zentrum des Nordlichts werde von der Inklinationsnadel angezeigt (Mém. Paris 1747). Daß das Nordlicht magnetische Störungen bedingt, ist zuerst von Hiorter und Celsius beobachtet (Abhandl. Stockholm 9, p. 30, 1741), was dann von Winkler ausführlich bestätigt ist (Progr. de comm. lum. borealis cum axa magn., 1767). Aber vorher hatte er den Zusammenhang mit der Elektrizität behauptet, vielleicht beeinflußt von Chr. Wolff, der in seinen Nützlichen Gedanken, II, das Nordlicht als einen nicht zur Ausbildung gekommenen Blitz bezeichnet hatte. Beccaria erklärt das Nordlicht für ein sichtbares Ausströmen von Elektrizität, etwa wie das Büschellicht (Lett. dell' elett., 1758, p. 272) und Winkler glaubt, es sei eine elektrische Wirkung der Sonne (Progr. Leipzig 1763). Canton ging von Versuchen mit evakuierten Röhren aus, die er in der Hand hielt und dem Konduktor der Elektrisiermaschine näherte; dann sah er den Lichtschein ganz ähnlich dem des Nordlichts (Phil. Trans. 48, II, p. 784, und 51, I, p. 403) und von Marum schreibt in seiner Arbeit (Über das Elektrisieren, 1777): Wer die Verbreitung des elektrischen Lichtes in der verdünnten Luft gesehen und die vollkommene Gleich-

heit mit dem Nordlicht daran bemerkt hat, wird leicht zugeben, daß diese sonderbare Lichterscheinung aus Strömen der elektrischen Materie, welche sich in dem oberen Teile des Luftkreises ausbreiten, bestehe! In den folgenden 80 Jahren ist man tatsächlich nicht weiter gekommen; nur die Störungen der magnetischen Verhältnisse wurden über allen Zweifel erhoben, so daß A. v. Humboldt das Nordlicht als magnetisches Gewitter bezeichnen konnte.

Erst durch Zöllner wurde die Bahn betreten, auf der man voran kam. Zöllner untersuchte das Nordlichtspektrum und verglich es mit dem der verdünnten Luft in Röhren (Pogg. Ann. 141, p. 574, 1870). Dabei stellte sich dann heraus, daß die charakteristische Nordlichtlinie in dem Luftspektrum fehlte. Allein Zöllner macht auf den Einfluß der Temperatur bei Ausbildung des Spektrums aufmerksam; daraus lasse sich wohl erklären, daß bei den außerordentlich niedrigen Temperaturen in den Luftschichten, worin das Nordlicht erscheine, sehr wohl eine solche Abweichung von dem gewöhnlichen Luftspektrum begreiflich sei.

Dann hat Lemström 1883 durch Armierung zweier Bergkuppen mit einem Netz niedriger Spitzen, wie er sagt, ein künstliches Nordlicht erzeugt und das Nordlichtspektrum beobachtet (Sitz.-Ber. d. elektr. Vereins Berlin 1883, Febr. 27). Diese Beobachtungen sind während der internationalen Polarforschung wieder aufgenommen und Lemström erklärt, daß dies künstliche Nordlicht das gleiche Spektrum habe, wie das natürliche (C. R. 99, p. 94, 1884). Darauf untersuchte ich das Spektrum des Büschellichtes (Nachr. Göttingen 1885, p. 305) und konnte in demselben vier Linien bestimmen, welche mit den von Vogel (Pogg. Ann. 146, p. 569, 1872) bestimmten Nordlichtlinien zusammenfallen. Gegenwärtig wird das Problem bekanntlich von verschiedenen Forschern untersucht.

Kristallelektrizität.

Die erste Nachricht von Kristallen, die besondere elektrische Eigenschaften haben, ist in dem anonym erschienenen Buche: Curiöse Speculationes bei schlaflosen Nächten von e. Liebh., d. gern spec., Leipzig 1707, gegeben. Da wird erzählt, daß die Holländer 1703 von Ceylon einen Stein mitgebracht hätten, den sie Aschentrecker nannten, weil er die Asche von glühenden Torfkohlen anziehe. Als Verfasser dieses Buches gibt G. Wiedemann Daumius an (Lehre v. d. Elektr. II, p. 390, 1894). Linné nannte den Stein Lapis electricus in der Vorrede zu seiner Flora Zeylanica 1747, und

Aepinus nennt ihn Turmalin (Mém. Berlin 1756). Er zeigt, daß der Turmalin keine Elektrizität hat, wenn er überall gleich warm ist; wird er erwärmt, so zeigen die beiden Enden entgegengesetzte Polarität, und das tun auch die Teilchen eines zerschlagenen Kristalls (Rec. d. diff. Mém. sur la tourmaline, Petersburg 1762). Wilson (Phil. Trans. 1759, p. 308) und Canton (ib., p. 398) hatten etwas abweichende Beobachtungen gemacht; aber es stellte sich heraus, daß Aepinus' Beobachtungen richtig waren, besonders durch die Untersuchungen von Torbern Bergmann (1735—1784; Abhandl. Stockholm 1762, deutsche Ausgabe, p. 62) und König (ib. 1766, p. 47). Bergmann zeigt, daß die Temperaturdifferenz der erzeugten Elektrizität proportional ist, und daß die Polarität beim Abkühlen der beim Erwärmen umgekehrt entspricht; er zeigt ferner, daß, wenn man das eine Ende des Turmalins auf konstanter Temperatur erhält, das andere aber erwärmt, nur an diesem Pol Elektrizität entsteht (Kleine phys. u. chem. Werke 1789, V, p. 474, 483). Das letztere hatte Canton in einer Arbeit über das Nordlicht nebenbei schon gesagt (Phil. Trans. 1759, p. 398). Bergmann hat auch schon nachgewiesen, daß der pulverisierte Turmalin auch die Eigenschaft besitzt (l. c. II, p. 138), was gewöhnlich Brewster zugeschrieben wird (Pogg. Ann. 2, p. 297, 1824). Eine sorgfältige und für jene Zeit abschließende Untersuchung der Pyroelektrizität lieferte Wilke (Abhandl. Stockholm 1768, p. 1 u. 97).

Von Bedeutung war, daß die gleiche Eigentümlichkeit von Wilson (l. c. 1763, p. 436) am brasilianischen Smaragd, von Canton (l. c.) am Topas, von Bergmann (l. c. 1762) am Doppelspat beobachtet wurde. Brewster hat dann ein größeres Verzeichnis solcher thermoelektrischer Kristalle aufgeführt (l. c. und Schweigg. Journ. f. Phys. u. Chem. 43, p. 94, 1825). Haüy (1743—1822) fand nun beim Borazit, daß nicht eine, sondern vier elektrische Achsen bei Erwärmung vorhanden seien entsprechend den vier Diagonalen eines Würfels. Er macht auch besonders darauf aufmerksam, daß beim Turmalin die Enden der Hauptachse verschieden ausgebildet seien, und meint, aus dieser Unsymmetrie erkläre sich das verschiedene Verhalten der Pole mit Bezug auf +- und —-Elektrizität (Journ. de Phys. 1778).

Ausgedehnter sind die Versuche, welche Haüy 30 Jahre später veröffentlichte. Da macht er die wichtige Entdeckung, daß die pyroelektrischen Kristalle auch durch Druck elektrisch werden. Er nahm eine Scheibe eines Doppelspats zwischen zwei Finger; dann wurde dieselbe +-elektrisch. Damit konstruiert er ein sehr empfindliches Elektroskop, indem er ein solches + gemachtes Stück

Spat an einem dünnen Harzfaden nach Art der Coulombschen Drehwage aufhing (Schweigg. Journ. 20, p. 383, 1817). Haüy untersuchte noch mehrere Kristalle und kam zu der Überzeugung, daß alle pyroelektrischen Kristalle sich durch Unsymmetrie der Enden (Hemiedrie) auszeichnen müßten (Mém. Paris, An. 4, I, p. 49).

Die Entdeckung Haüys veranlaßte Becquerel, auch andere Körper auf Druck zu untersuchen; er fand, daß auch Wachstaffet und andere Körper durch Druck elektrisch werden (Gilb. Ann. 73, p. 117, 1823, und Pogg. Ann. 12, p. 147, 1828). Diese Elektrizitätserregung bei Kristallen wurde Piezoelektrizität genannt. Bei diesen Kristalluntersuchungen stellt sich Becquerel den Kristall nach Art der Magnete aus polarisierten Molekülen bestehend vor; daß dann im normalen Zustande an den Enden keine Ladung nachgewiesen werden kann, ist durch die Ableitung an der Luft zu erklären; durch Erwärmung und Druck findet eine Verschiebung der molekularen Pole und damit eine Ladung an den Enden statt. Die Ausbildung dieser Grundvoraussetzung ist jedoch erst sehr viel später erfolgt (s. unten); die Piezoelektrizität ist noch später erst wieder behandelt worden.

Zunächst arbeiteten die meisten Forscher so, daß sie beim Erwärmen oder Abkühlen die verschiedenen Flächen der Kristalle mit der Probekugel abtupften und am Elektrometer die Art und Stärke der Ladung feststellten. In dieser Richtung arbeiteten Rose (Abhandl. Berlin 1836), Rieß (ib. 1843), Karsten (Pogg. Ann. 71, p. 243, 1847), ganz besonders aber Hankel, der von seiner Dissertation 1839 an bis in sein hohes Alter immer wieder zu solchen Untersuchungen zurückkehrte und zu dem Resultat kam, daß die Pyroelektrizität bei Kristallen aller Systeme mit ungleichwertigen Achsen und unter besonderen Umständen auch beim regulären System durch den Unterschied der Flächen- und Eckenachsen auftreten kann. Nahezu alle Bände der Abhandlungen der sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften enthalten solche Untersuchungen an vielen Kristallen. Dabei will Hankel (Abhandl. Leipzig 20, p. 459, 1881) neben der Pyroelektrizität und Piezoelektrizität die Aktinoelektrizität, welche durch Bestrahlung der Kristalle entsteht, einführen. Daß sie wesentlich andersartig sei als die Pyroelektrizität, ist aber nicht überzeugend nachgewiesen.

Eine andere Methode, die Ladungen auf den Flächen nachzuweisen, ist von Kundt angewandt; er benutzt das sogenannte elektrische Pulver aus Mennige und Schwefel, das sehr oft nach Lichtenberg genannt wird (Wied. Ann. 20, p. 592, 1883, und

28, p. 145, 1886); aber es ist nicht von Lichtenberg erfunden (s. unten). Diese Methode ist seit Kundt von verschiedenen Experimentatoren wieder aufgenommen und bis in die neueste Zeit fruchtbar angewandt. Daß die Art der Erwärmung von Einfluß auf die Stärke wie Verteilung der Ladung ist, hat Röntgen am Quarz nachgewiesen (Wied. Ann. 19, p. 513, 1883) und in demselben Jahre Friedel und Curie an der Blende von Santander und chlorsaurem Kali (C. R. 97, p. 61). Die meisten Untersuchungen sind jedoch am Turmalin angestellt, der die stärkste Pyroelektrizität zeigt und durch die meist vollkommene Ausbildung schon äußerlich die Bestimmung der Pole zuläßt, indem an dem einen Ende die Flächen des Hauptrhomboeders auf den Kanten des dreiseitigen Prismas aufgesetzt sind; diesen nannte Rose den analogen Pol, den anderen den antilogen (Abhandl. Berlin 1836). Da durch die oben erwähnten Versuche nachgewiesen war, daß die kleinsten Teile des Turmalins die gleiche Polarität zeigen, wie der ganze Kristall, lag die Auffassung nahe, den Turmalin ähnlich zu betrachten wie den Magneten und so auch für den Kristall ein elektrisches Moment zu bestimmen. Das führte ich aus durch Aufhängen an isolierendem Faden in einem Erwärmungs- und Abkühlungsraum durch Ablenkungsbeobachtungen beim Einwirken einer konstant geladenen Kugel (Nachr. Göttingen 1877, p. 474). Die gleiche Auffassung über die molekulare Polarisation hat W. Thomson (Phil. Mag. 5, p. 24, 1878). Demnach müßte der Turmalin dauernd an den Polen Ladung zeigen; daß er es nicht tut, ist durch oberflächliche Leitfähigkeit zu erklären. Die Versuche von Riecke haben diese Auffassung wesentlich gestützt (Wied. Ann. 28, p. 43, 1886; 31, p. 799, 1887; 40, p. 306, 1890), besonders für die Abkühlungsperiode, da bei der ruhigen Abkühlung nicht so viel störende Einflüsse sich geltend machen wie bei der Erwärmung. Durch die Versuche von Jaques und Pierre Curie über Piezoelektrizität, welche über den molekularen Zustand des Turmalins die gleiche Anschauung hatten, haben unzweideutig gezeigt, daß die Elektrizitätserregung durch Druck der Abkühlungsperiode, die durch Ausdehnung der Erwärmungsperiode entsprechen (C. R. 92, p. 186 u. 350; 93, p. 204, 1881). Auf Grund seiner Elastizitätstheorie hat dann Voigt beide Elektrizitätserregungen zusammengefaßt und eine umfassende Theorie der Kristallelektrizität gegeben in Verbindung mit Riecke (Abhandl. Göttingen 1892, und Wied. Ann. 45, p. 523, 1892), welche gestattet, nach experimenteller Bestimmung von vier Konstanten die Erscheinungen vorhersagen zu können.

Elektrische Figuren.

Bei der Untersuchung des Elektrophors hatte Lichtenberg beobachtet, daß man auf die Nichtleiter an einzelne Punkte sehr wohl elektrische Ladungen bringen kann. Er setzt auf einen solchen Harzkuchen einen dreischenkligen Zirkel mit den Spitzen, gibt demselben durch einen Funken vom Konduktor der Maschine eine +-Ladung, hebt den Zirkel mit isolierendem Stabe ab und bestreut nun den Kuchen mit feinem Harzstaub durch ein Siebtuch, so findet er, daß an den Stellen, wo die Spitzen gestanden haben, der Staub strahlenförmig verästelt haftet, während er an den übrigen Stellen lose aufliegt und fortgepustet werden kann. Dreht er den geriebenen Kuchen um, so daß die nun oben liegende Fläche + ist, und setzt wieder den Zirkel auf, gibt ihm aber negative Ladung, so haftet das Pulver an allen Gebieten der Kuchenoberfläche, nur nicht in einem Kreise um die Stelle, wo die Spitzen standen. Durch vielfache Abänderung des Versuches stellt er fest, daß die positive Figur stets Verästelung zeigt, die negative homogen kreisrund ist (Nov. Comm. Göttingen 8, 1777, und 9, 1778). Statt des Harzpulvers kann er auch Schwefelpulver oder Semen lycopodii nehmen. Daß in der Tat die Pulver von Harz und Schwefel beim Durchsieben — elektrisch werden, hat auch Cavallo nachgewiesen (Phil. Trans. 1780). Daß es aber auch Pulver gibt, die beim Durchsieben + elektrisch werden, zeigt Bennet am Eisenfeilicht und Vasalli an anderen Metallpulvern (Phil. Trans. 1787, p. 26 und Gilb. Ann. 7, p. 498, 1801).

Das brachte den Straßburger Professor Villarsy (1745—1814) auf die Idee, zwei verschiedene Pulver gleichzeitig durch das Tuch zu sieben, Schwefelblume und Mennige, von denen ersteres —, letzteres + wird beim Durchsieben, so daß die Lichtenbergschen Figuren nun nicht nur durch die Form, sondern auch durch die Farbe verschieden sind (Journ. gen. de France 1788). Dies oft fälschlich Lichtenbergsches Pulver genannte Gemisch ist durchaus zuverlässig, während andere Kombinationen ihren elektrischen Charakter je nach den Verhältnissen änderten. Es ist viel angewandt; schon in Voigts Mag. 8, p. 176, wird es für Ladungsnachweise empfohlen und zeigt Ladungen an, die mit Elektrometer kaum nachweisbar sind. Aus der großen Zahl von Anwendungen erwähne ich nur noch die v. Bezolds (1837—1907) am Elektrophor, um die auf der Rückseite des Kuchens durch Funkenentladung aus der Form entstehenden partiellen Ladungen nachzuweisen (Berichte München

1870 u. 1871). Für das gute Gelingen der Staubfiguren hat schon Lichtenberg darauf aufmerksam gemacht, daß die diskontinuierliche Entladung wesentlich ist; wenn man das Durchsieben im luftverdünnten Raume ausführt, so werden die Figuren undeutlich. — Eine andere Art „elektrischer Figuren“ hat Priestley zuerst beschrieben. Er ließ auf eine Stelle einer glatten Messingplatte 30 bis 40 Funken entladen; dann zeigten sich dort Newtonsche Ringe. Er erklärt die Sache auch richtig als Oberflächenfarben durch die Oxydation (Gesch. d. Elektr., 1766, p. 466).

Wasserfallelektrizität.

Den Ausgangspunkt für diese Untersuchungen bildet die Beobachtung Gordons 1744, daß Wasserstrahlen, die aus elektrisierten Wasserbehältern durch hydraulischen Druck aufsteigen, höher geschleudert werden, sich viel breiter in Tropfen ausbreiten und die Umgebung elektrisieren, als wenn das Wasser nicht elektrisiert war (Gralath, Geschichte, II, p. 357, 1751). Dazu kam eine zweite Beobachtung von Lichtenberg (l. c.), daß Wassertropfen, welche aus einer unelektrischen Röhre abfielen auf eine geneigte, isolierte Metallplatte, diese Platte stark elektrisierten. Er schließt daraus, daß die Reibung der herabrollenden Tropfen die Ursache der Elektrizität ist. Dann machte Saussure die Bemerkung, daß fallende Tautropfen die Erde stark elektrisch machten (Voy. dans l. Alpes II, p. 256, 1781), und Tralles beobachtet 1780 an dem Wasserfall bei Lauterbrunnen, daß der Wasserstaub die Umgebung stark elektrisch mache; das Elektrometer zeigte —-Ladung (Volta, Ges. Werke II, p. 239). Ganz analoge Messungen führte Schübler am Falle des Reichenbachs aus (Schweigg. Journ. 9, p. 358, 1810). Die Gordonschen Versuche wiederholte Fuchs (Pogg. Ann. 102, p. 633, 1856) und macht die neue Beobachtung, daß ein unelektrischer Strahl sich bei schwacher Influenz kontrahiert. Das höhere Ansteigen des elektrischen Strahles will Reitlinger durch eine verminderte Adhäsion des Wassers an dem Mundstück des Ausflußrohres erklären (Berichte Wien 39, p. 590, 1860). Reitlinger dehnt seine Versuche auch auf ausfließendes Quecksilber aus. Auch die Versuche von Beetz (Pogg. Ann. 144, p. 443, 1871) und von Rayleigh (Proc. R. S. 28, p. 406, 1879) haben das Problem nicht wesentlich gefördert; aber von allen Genannten wird betont, daß man reines Wasser haben muß; geringe Verunreinigungen bringen große Störungen hervor. Endlich hat auch die Versuchsanordnung Faradays einige

Bedeutung, der nachwies, daß ein feuchter Luftstrom eine Harzplatte beim Darüberhinstreichen elektrisiere (Pogg. Ann. 60, p. 330, 1843). Dann stellte ich durch Versuche fest, daß das in Bildung begriffene Wasserteilchen in der Luft +-Elektrizität zeigt, und diese +-Elektrizität wird durch die Reibung, teils an dem Staub in der Luft, teils an verschieden temperierten Wasserteilchen entstehen (Meteor. Ztschr. II, p. 1 u. 100, 1885). Diese Versuche sind von Elster und Geitel wieder aufgenommen (Berichte Wien 99, 1890), mit dem Resultat, daß Wassertropfen, die an einer nicht benetzenden Fläche reiben, stets + elektrisch werden; welcher Stärke dieselbe ist, hängt sehr von der Temperatur ab.

Dann begann Lenard seine ausgedehnten Versuche mit dem Resultat: Wassertropfen, die auf Wasser oder einen benetzten Körper fallen, werden +-Elektrizität im Wasser erzeugen. In Tropfen zerfallende Strahlen geben intensive Ladungen, Verunreinigungen des Wassers stören die Wirkung sehr. Lenard sieht die Quelle der Elektrizität in den Zusammenstößen der Wassermassen untereinander und mit dem nassen Gestein. Eine Erklärung scheint ihm möglich durch die Annahme, daß zwischen Wasser und Luft Kontaktelektrizität entsteht (Wied. Ann. 46, p. 584, 1892). In einer Reihe späterer Arbeiten auch seiner Schüler kommt Lenard auf diese Elektrizitätserregung zurück. Auch die Beobachtungen von Elster und Geitel an unterirdischen Wasserfällen, wo also eine Influenz seitens der Erdladung ausgeschlossen ist, bestätigen Lenards Anschauung (Wied. Ann. 47, p. 496, 1892).

Entladung.

Nach Franklins Theorie bestand die Entladung darin, daß von einem Körper, der zuviel Elektrizität besaß, der Überschuß auf einen anderen, der zu wenig hatte, überging. Danach war der Funke immer in der Richtung vom +- zum —-Körper zu erwarten. Diese Theorie widerlegte er selbst nach Erscheinen der Symmerschen durch den Versuch, daß er den Funken einer Batterie durch ein Buch schlagen ließ und nun sah, daß das Loch durch das Buch an beiden Seiten nach außen gebogene Ränder habe (Exper. a. Observ., 1769). Nun hatte Hales schon bemerkt, daß der Funken verschieden gefärbt sei, je nach der Substanz des Konduktors (Phil. Trans. 1748), und Saxtorf zeigte, daß nicht nur der +-Konduktor über die Farbe entscheide, sondern auch der negative. Priestley untersuchte den Funken zuerst spektroskopisch und findet ein

kontinuierliches Spektrum wie beim Sonnenlicht (Gesch., p. 485). Ich habe schon die Lanesche Maßflasche erwähnt; sie setzte voraus, daß die Schlagweite stets proportional der Ladungsstärke ist. Daß diese Voraussetzung falsch ist, folgte schon aus der Beobachtung Winklers (l. c.), daß die Funkenentladung wesentlich von der Luftfeuchtigkeit abhänge.

Ein Maß für die Stärke des Funkens fand Kinnersley 1761 in seinem Luftthermometer (Exper. a. Observ., p. 389). In den mit doppelt gebogener Röhre versehenen Kolben ragen zwei mit Kugeln versehene Drähte. Die Kugeln stehen einander mit variabler Distanz gegenüber. In die Röhre wird eine Flüssigkeit zum Teil eingegossen. Der überspringende Funke dehnt die Luft im Kolben aus und aus der Höhe des Anstiegs in der Röhre leitet Kinnersley (geb. 1712) ein Maß für die Stärke der Entladung ab. Vorher hatte Kinnersley die Entladung durch die Länge des von dem Funken geschmolzenen Eisendrahtes gemessen (Phil. Trans. 1763, p. 84). Priestley beobachtete dann an diesem Kinnersleyschen Luftthermometer, daß nach einer Reihe von Funkenentladungen das Luftvolumen dauernd vermindert sei (Phil. Trans. 1785), und schloß daraus, daß für den Funken Luft verbraucht sei. Cavendish stellte nun fest, daß sich durch den Entladungsschlag Salpetersäure gebildet habe, d. h. N_2O_5, und um diese „Ausbeute“ zu vergrößern, führt er in den Raum freien Sauerstoff ein, so daß das Gasgemisch schon das für Salpetersäure notwendige Verhältnis: Stickstoff zu Sauerstoff gleich 2 : 5 hat (Phil. Trans. 1788).

Aus dieser Entstehung des Salpetersäureanhydrids wollte man auch den eigentümlichen Geruch erklären, der bei den starken Funkenentladungen bemerkt war und der in den älteren Beschreibungen von Blitzschlägen als „Schwefelgeruch“ einen breiten Raum einnimmt. Jedoch schon Franklin hat 1749 (Exper. a. Observ., p. 84) diesen Geruch auf eine Einwirkung der Elektrizität auf die Konstitution der Luft zurückgeführt. Aber es hat fast 100 Jahre gedauert, ehe diese Einwirkung durch den Funken wirklich nachgewiesen und erklärt wurde. Schönbein fand die Bildung von Ozon, des dreiatomigen Sauerstoffs, und verteidigte seine Entdeckung gegen eine große Reihe von Einwänden mit Glück (Pogg. Ann. 50, p. 616, 1840). Für die Umwandlung des reinen Sauerstoffs in Ozon und Autozon ist wertvoll der Nachweis von Marchand (ib. 67, p. 143, 1846). Die weitere Entwicklung dieser Frage hat wesentlich chemisches Interesse. Nur sei bemerkt, daß v. Marum in seinem Rezipienten zuerst größere Mengen von Ozon

herstellte, natürlich ohne Erklärung, und auch die Wirkung des Funkens auf verschiedene Gase untersuchte (Beschreib. einer Elektrisiermaschine, Forts., p. 36, 1788).

Die seit Franklins Versuchen über das Schmelzen von dünnen Drähten bei Entladung von Batterien oft wiederholten Versuche führten Paetz van Troostwyk und Deimann dazu, den Funken auch durch Wasser gehen zu lassen. Bei jedem Entladungsschlage bemerkten sie die Entstehung von Gas in dem breiten Ende der mit eingeschmolzenen Platindrähten versehenen Barometerröhre. Nachdem sie so viel Gas entwickelt hatten, daß der Funke zwischen den Platinenden durch das Gas ging, erfolgte eine plötzliche Wiedervereinigung der erzeugten Gase zu Wasser am 12. 11. 1789. Sie erklären, damit sei der Beweis erbracht, daß Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff bestehe (Gren's Journ. 2, p. 130, 1790). Pearson nahm diese Versuche wieder in großem Maßstabe auf, aber ohne Verständnis für die richtige Erklärung der beiden Holländer (Phil. Trans. 1797, p. 142, und Nichols. Journ. 1, p. 349, 1797). Van Marum erklärte den Schmelzungsvorgang der dünnen Metalldrähte richtig; durch den Widerstand werde beim Durchschlagen des Funkens Wärme erzeugt, der glühende Draht nehme Sauerstoff aus der Luft auf (Verkalkung) und verbrenne so, so daß nur bei den Metallen, welche sich leicht mit Sauerstoff verbinden (Eisen und Zinn) diese Oxyde entstehen. Dagegen gelang ihm bei anderen Oxyden die Reduktion (Mennige, Quecksilberoxyd; Gilb. Ann. 1, p. 272, 1799).

Großes Aufsehen machte eine Beobachtung von Groß (Elektrische Pausen, Leipzig 1776), daß bei Annähern einer zur Erde abgeleiteten Spitze an den Konduktor der Elektrisiermaschine zunächst das Büschellicht entsteht, bei größerer Annäherung aber Funkenentladung eintritt; geht man dann wieder zurück, so findet wieder Büschelentladung statt, um bei noch größerer Entfernung noch einmal Funkenentladung zu geben. Nairne hat diese Versuche wiederholt und die Abstände der Grenzen gemessen, aber keine Erklärung dazu gefunden (Phil. Trans. 1778). Erst Rieß stellte die Sache richtig (Reibungselektr. II, p. 127).

Das Schmelzen der Drähte durch den Entladungsfunken ist von Priestley ausführlich untersucht (Gesch., p. 362), und er fand ein empirisches Gesetz, daß die elektrische Kraft, welche das Schmelzen bewirke, proportional sei der Länge des Drahtes und dem Quadrat seines Querschnitts. Er fand auch, daß es ein Unterschied sei, ob man die Schmelzung in der freien Luft vornehmen wolle, oder ob man den Draht in enge Glasröhren eingeschlossen habe. Aber

den Einfluß des Wärmeisolators fand er nicht (ib., p. 427 u. 487). Auch hier hat Rieß erst sorgfältige Meßversuche angestellt. Er änderte das Kinnersleysche Luftthermometer so ab, daß er an Stelle der Kugeln zwei kleine Ringe setzte, in welchen er die zu untersuchenden Drähte einhängen konnte, während Kinnersley nur gelegentlich über die beiden Kugeln Drähte oder Streifen, z. B. von Goldschaum, gelegt hatte; dann war die Länge immer sehr fehlerhaft gewesen, während bei Rieß (1805—1883) sehr konstante Längen gemessen wurden. Er stellte dabei fest, daß die Temperaturerhöhung proportional dem Produkt aus Elektrizitätsmenge (im Coulombschen Sinne) und Dichtigkeit sei, oder auch proportional dem Quadrat der Elektrizitätsmenge, dividiert durch die Entladungszeit. Die Verzögerung der Entladungszeit war proportional der Länge des Drahtes und umgekehrt dem Querschnitt. Den Proportionalitätsfaktor, der von der Natur des Drahtes abhängt, nennt er Verzögerungskraft und führt den Begriff der reduzierten Länge ein = der wirklichen Länge, dividiert durch das Quadrat des Querschnittradius, multipliziert mit der Verzögerungskraft. Ebenso leitete er für die Schlagweite eines Funkens d eine empirische Formel ab $d = b \cdot q/s$, wo q die Elektrizitätsmenge der Batterie, s die Anzahl der Flaschen und b konstant ist. Doch gelten diese Rießschen Formeln (Pogg. Ann. 40, p. 335, 1837; 43, p. 63, und 45, p. 1, 1838) nur angenähert, wie Rijke (Pogg. Ann. 106, p. 411, 1859; 109, p. 124, 1860) gezeigt hat.

Die Frage nach dem Wesen der Entladung war durch die Rießschen Untersuchungen, obwohl er zwischen kontinuierlicher und diskontinuierlicher Entladung unterscheidet, noch nicht aufgeklärt. Das ist erst durch die Lebensarbeit von Feddersen (1832—1918) geleistet, der mit seiner Doktordissertation (Kiel 1857) den elektrischen Funken als Thema wählt und durch eine lange Reihe von Arbeiten beibehält (Pogg. Ann. 103, p. 69, 1858; 108, p. 497, 1859; 112, p. 452, 1861; 113, p. 437, 1861; 116, p. 132, 1862). Die Entladung ist bei geringem Widerstand kontinuierlich, im rotierenden Spiegel erscheint nur ein Lichtstreifen; bei Widerständen über 400 S.-E. zerfällt die Entladung in Partialfunken, die bald in gleichförmigem Abstand, bald ganz unregelmäßig auftreten. Endlich findet Feddersen die oszillierende Entladung, wenn bei hinreichender Länge der Schließung der Widerstand gering ist (l. c. 112 u. 113). Durch Photographie der durch den rotierenden Spiegel gegebenen Bilder (l. c. 116) ist nicht nur der oszillatorische Charakter der Entladung, sondern auch der Einfluß der Elektroden deutlich

gemacht. Es zeigt sich, daß die Dauer der einzelnen Schwingung unabhängig von der Schlagweite, aber proportional der Quadratwurzel aus der Kapazität der Batterie ist. Die nahezu gleichzeitig angestellten Versuche Knochenhauers (Ber. Wien 25, p. 31, 1857, bis 33, p. 163) geben ein ähnliches Bild; doch sind sie weniger systematisch durchgeführt.

Die Theorie dieser oszillierenden Entladung ist von Kirchhoff (Pogg. Ann. 121, p. 551, 1864) gegeben. Bestätigung der Feddersenschen Beobachtungen gibt Lorenz (Wied. Ann. 7, p. 161, 1879). Ausdehnung auf die Entladung des Kondensators bei einem Induktionsapparat liefert Boys (Phil. Mag. 30, p. 248, 1890). Daß auch die Entladung eines großen Konduktors ohne Kleistsche Flaschen oszillatorisch erfolgen kann, zeigt v. Oettingen (Wied. Ann. 40, p. 83, 1890), nachdem derselbe schon 1862 durch direkte Beobachtung der Rückstände der Kleistschen Batterie den Zusammenhang mit der oszillatorischen Entladung aufgewiesen hatte (Pogg. Ann. 115, p. 513).

Mit Hilfe der Potentialtheorie (s. unten) hatte W. Thomson den Vorgang der Entladung theoretisch abgeleitet und die Bedingungen gegeben für das Eintreten der kontinuierlichen und der oszillatorischen Entladung. Für letztere ergab sich die Schwingungsdauer

$$t = 2\pi\sqrt{C \cdot L},$$

wo C die Kapazität des Konduktors und L das Potential der Leitungsteile aufeinander ist (Phil. Mag. 5, p. 393, 1855). Diese Formel hat sich bei den späteren Versuchen bewährt. Die weiteren Bemühungen um die oszillatorische Entladung hängen mit den Induktionsströmen zusammen und werden daher weiter unten behandelt. Daß auch die kontinuierliche Entladung nicht ein einmaliger momentaner Akt ist, sondern daß die Hauptentladung durch Funken vorbereitet wird durch eine Reihe Büschelentladungen und daß auch der Blitz eine solche Vorbereitung durch Büschel und Glimmlichtentladungen erfährt, ist durch die beachtenswerten Photographien von Walter hinreichend nachgewiesen (Wied. Ann. 66, p. 636, 1898; 68, p. 776, 1899; Ann. d. Phys. 10, p. 393, 1903).

Daß diese oszillatorische Entladung der Kleistschen Flaschen mit der Rückstandsbildung zusammenhängt, ist schon gesagt; die seinerzeit erwähnte Theorie Wilkes über die Polarisation des Isolators ist von Faraday wieder aufgenommen und ausführlich behandelt (Exp. res., p. 1128—1224). Mit Hilfe dieser Theorie wollte

Faraday auch den Vorgang der Entladung erklären. Er meint, zwischen +-und —-Funken unterscheiden zu müssen. Daß diese Annahme unzulässig sei, ist alsbald von Rieß berichtigt. Nach seiner Theorie müßte der Rückstand stets den gleichen Charakter haben wie die erste Ladung (Exp. res., § 1426—1579) und dementsprechend müßten auch die Funken stets gleich gerichtet bleiben. Es zeigte sich, daß bei der oszillatorischen Entladung das Gegenteil die größere Wahrscheinlichkeit hat.

R. Kohlrausch stellte nach den Grundsätzen des Weberschen Grundgesetzes eine Theorie der Rückstandsbildung auf, wobei er polarelektrische Moleküle in dem Isolator voraussetzt und findet, daß der Rückstand immer ein konstanter Bruchteil der vorherigen Ladung ist. Diese Regel hat sich weitgehend bewährt (Pogg. Ann. 91, p. 56 u. 179, 1854). Die Einwände v. Bezolds (Pogg. Ann. 125, p. 132, 1865; 137, p. 223, 1869) sind von Clausius widerlegt, der die Kohlrauschsche Theorie verteidigt (ib. 139, p. 276, 1870). Demgegenüber hat Maxwell aus der Wilkeschen Grundanschauung über die Konstitution der Dielektrika gezeigt, daß Rückstandsbildung immer dann eintreten muß, wenn das Verhältnis von Dielektrizitätskonstante zum Leitungsvermögen nicht überall in dem Isolator den gleichen Wert hat, daß dagegen bei völlig homogenen Körpern kein Rückstand eintreten kann (Treat. on Electr. a. Magn., § 328—330). Dieses Ergebnis hat sich bewahrheitet in der Untersuchung von Hertz an Benzin (Wied. Ann. 20, p. 279, 1883), von Rowland und Nichols am Kalkspat (Phil. Mag. 11, p. 414, 1881), wo keinerlei Rückstandsbildung eintrat. In gleichem Sinne ist das Ergebnis der Untersuchung von Arons an Paraffin aufzufassen (Wied. Ann. 35, p. 291, 1888).

Tierische Elektrizität.

Die Schläge des Raja torpedo waren im Altertum bekannt, aber in keinerlei Beziehung zur Elektrizität gebracht. Man glaubte, sie als mechanische Leistungen der Muskeln deuten zu können. Diese Ansicht war noch im Anfang des 18. Jahrhunderts allgemein anerkannt, wie Äußerungen von Réaumur (1683—1757) und anderen zeigen (Mém. Paris 1714). Als Adamson den Silurus electricus aus Afrika mit nach London brachte, verglich er seine Schläge mit der Entladung einer Kleistschen Flasche (Phil. Trans. 1751). Dagegen hat der erste Berichterstatter über den Gymnotus electricus, Piso (Hist. of Brazil.), nichts von Elektrizität gesagt, ebenso-

wenig Richer, der in seinem „Tagebuch“ 1671 aus Cayenne den Fisch erwähnt.

Erst 1773 zeigte Walsh (Phil. Trans. 58, p. 461), daß man beim Raja torpedo (Zitterrochen) nur dann einen Schlag erhalte, wenn man mit der einen Hand den Rücken, mit der anderen den Bauch berührt. Nachdem der Fisch einen Schlag erteilt hat, ist er matt und es bedarf einer Ruhepause, ehe er sich zu einem neuen Schlage aufreizen läßt. Bei einer Sektion findet Walsh das elektrische Organ hinter dem Schädel, zwischen den Kiemen, aus über 1100 Säulen bestehend. Dies Organ bringt den Schlag hervor, alle übrigen Körperteile sind nur Leiter. Das Organ selbst faßt Walsh als eine Batterie auf, wo die Isolatoren durch die jedes einzelne Säulchen umschließenden Häute dargestellt seien. Auch der stärkere Gymnotus electricus (Zitteraal) wurde erst 1773 von Hunter zerlegt und ein elektrisches Organ entdeckt (Phil. Trans. 1773, II 2, p. 365). Daß hier wirklich elektrische Ladung vorhanden ist, wurde freilich erst von Santi Linari am Elektroskop nachgewiesen (Pogg. Ann. 40, p. 643, 1837) und von Schönbein ausführlich begründet (Beob. über elektr. Wirk. d. Zitterwels., 1841, p. 11). Die elektrischen Fische hatten naturgemäß den Gedanken bei vielen ausgelöst, daß noch andere Tiere solchen Apparat besäßen. Ich übergehe die zahlreichen Versuche, derartiges zu finden, da sie ergebnislos waren.

Galvanismus.

Auch Galvani (1737—1798) gehörte zu denen, die nach tierischer Elektrizität suchten; allein seine große Entdeckung stand mit diesem Suchen nur indirekt in Verbindung. Die Legenden über die Erfindung übergehe ich, da sie sehr mangelhaft beglaubigt sind; Poggendorff erzählt sie. Galvani selbst erzählt durchaus glaubwürdig (Galvani, De viribus Electricitatis in motu musculari: Comm. Bonon. 7, p. 363, 1791 [In dieser ersten Veröffentlichung verlegt Galvani die Entdeckungszeit in das Jahr 1780]; Abh. über d. Kräfte d. tierischen Elektr., deutsch von Mayer, 1793, p. 3), daß einer seiner Studenten bemerkt habe, daß ein hautentblößter Froschschenkel stets zusammenzucke, wenn er den inneren Kruralnerven mit einer Messerspitze berühre; ein anderer Student bemerkt, daß die Zuckung nur erfolgt, wenn gleichzeitig aus der nebenstehenden Elektrisiermaschine ein Funken gezogen wird; sie riefen Galvani und er suchte nun die Bedingungen festzustellen. Die Zuckungen erfolgten nur, wenn zwischen den Nerven-

enden und dem Muskel leitende Verbindung war, sobald ein Funke in der Nähe eine Entladung brachte. Auch im luftleeren Raume fanden die Zuckungen statt. Um den stärksten Funken, den Blitz, wirken zu lassen, hing Galvani die Froschschenkel auch in die Leitung der Franklinschen Wolkenstange; nicht nur bei jeder Blitzentladung, sondern auch beim Vorüberziehen von Regenwolken zeigten sich solche Zuckungen (l. c., p. 21). Bei heiterem Himmel beobachtete Galvani die Zuckungen, wenn er die Schenkel an Haken über sein eisernes Gartengitter hing, sobald durch den Wind die Muskeln mit den Eisenstäben in Berührung kamen. Das veranlaßte Galvani, im Laboratorium den Schenkel zu untersuchen; wenn derselbe auf einer Metallplatte lag, so erfolgten Zuckungen, wenn die durch das obere Nervenende gesteckte Nadel die Metallscheibe berührte. Er legte dann den Schenkel auf eine Glasplatte, berührte mit einem Metalldraht Nerven und Muskel und sah Zuckungen stets, wenn der Metalldraht aus Eisen und Kupfer oder Kupfer und Silber bestand, bisweilen auch, wenn er nur einen Eisendraht nahm. Diese letzte Beobachtung veranlaßte ihn, den Sitz der Elektrizität allein in dem Organismus zu suchen.

Daß der Eisendraht auch die Zuckungen hervorrief, wurde von Volta (s. unten) dahin richtig gestellt, daß er es nur tat, wenn die beiden Enden irgendwie durch Härte, Oberflächenstruktur usw. verschieden waren. Galvani meinte nun, da er auch an anderen Tieren, z. B. Schafen, die gleichen Eigenschaften entdeckte, eine allgemeine tierische Elektrizität entdeckt zu haben (p. 35) und verlor sich dann in vagen Spekulationen.

Ich übergehe die zahlreichen Versuche und Theorien anderer Forscher, die sich in der gleichen Richtung bewegten. Aber Gren fügte der Wiedergabe der Galvanischen Entdeckung sofort die Bemerkung an, daß durch diese Versuche noch nicht eine tierische Elektrizität nachgewiesen sei, und sein medizinischer Kollege in Halle, Reil (1758—1813), sprach zuerst die Überzeugung aus, daß durch diese Versuche nur nachgewiesen sei, daß die Nerven eine große Reizbarkeit für Elektrizität hätten, daß die Elektrizität vielmehr aus der Berührung der Metalle käme (Gren's Journ. 6, p. 409, 1792). Das ist die erste Beobachtung der Berührungselektrizität. Alle übrigen Beobachter traten der Galvanischen Ansicht bei, auch Volta, der im Gegensatz zu Galvani die Nerven für —, die Muskeln für + elektrisch hielt, während Galvani das Gegenteil meinte. Er sowohl wie Galvani faßten die Sache also nach Art einer Kleistschen Flasche auf: „Nerven und Muskeln haben

stets Elektrizität, aber sie ist im Gleichgewicht; erst durch die Berührung mit dem Metall wird dieses gestört und dann durch den leitenden Bügel wieder hergestellt“ (Schrift. üb. tier. Elektr. v. Volta, deutsch v. Mayer, 1793, p. 4, dann auch die ersten Briefe Voltas über tier. Elektr., 5. 4. 1792).

Die ersten Versuche Galvanis über die Froschschenkelzuckungen erklärt Volta richtig (p. 70) durch den Rückschlag, welcher von Mahon (Princ. of electr., 1779) zuerst richtig erklärt war. Volta zeigt hier zuerst, daß die Erregung der Nerven eine spezifische ist, daß z. B. durch Berühren des Kopfes mit dem Leitungsdraht oberhalb der Augen und am Gaumen der Sehnerv so angeregt wird, daß man einen Lichtschein sieht. Volta wiederholt den Versuch Sulzers (Hist. Berlin 1754, p. 356, Note). Er legt auf die Mitte der Zunge eine Silber- oder Goldmünze und auf die Spitze ein Stanniolblatt, berührt die beiden Belegungen durch einen Draht und findet die Geschmacksempfindung, wie einst Sulzer. Aber er unterscheidet: In der beschriebenen Anordnung ist der Geschmack säuerlich, vertauscht er die Belegungen, so ist der Geschmack alkalisch (l. c., p. 142). Etwas früher berichtet Lichtenberg aus dem Briefe eines ungenannten englischen Freundes über das gleiche Experiment (Gren's Journ. 6, 1792). Volta erwähnt hierbei schon, daß zwei verschiedene Metalle notwendig sind (l. c., p. 122). Doch erst 1794 beginnen Voltas Versuche, die tierische Elektrizität auszuschalten, von der schon Fowler nachgewiesen hatte, daß sie jedenfalls etwas anders sei als die bei den elektrischen Fischen erkannte; denn da habe man bestimmte Organe, wo die Elektrizität erzeugte werde, gefunden, bei den Froschschenkeln existieren solche nicht (Exper. a. Observ. rel. to animal electr., 1793).

Voltas Experimente sind von Gren sämtlich ins Deutsche übertragen: Er zeigte, wie schon erwähnt, daß mit einem Metall nur Zuckungen erzeugt wurden, wenn die beiden Enden des Drahtes irgendwie verschieden seien (Gren, Journ. 8, p. 400). Dann untersucht er verschiedene Metalle (Gren, N. Journ. 2, p. 471). Es folgt der bekannte Voltasche Versuch, an einem Duplikator die durch Berührung zweier Metalle entstandene Elektrizität nachzuweisen (ib. 3, p. 480, 1796). Er sagt, man könne diese Elektrizität mit dem gleichen Recht metallische wie tierische Elektrizität nennen; aber er schlägt hier zuerst den Namen „Galvanismus“ vor. Er unterscheidet nun Leiter erster und zweiter Klasse; letztere sind die Flüssigkeiten. Die lange Reihe der Veröffentlichungen seitens der Gegner der Voltaschen Erklärung übergehe ich, da sie nichts Fruchtbares ent-

deckten; aber etwas Neues kam durch die chemischen Wirkungen in die Behandlung der Frage.

Am 10. April 1796 schreibt Dr. Ash an A. v. Humboldt: Legen Sie zwei homogene, befeuchtete Zinkplatten aufeinander, daß sie sich möglichst gut berühren, so werden Sie recht wenig Veränderung an den Platten merken; machen Sie den Versuch mit Zink und Silber, so scheint sich das Zink zu oxydieren, während das Silber mit feinem weißen Staub bedeckt erscheint (A. v. Humboldt, Über die gereizte Muskel- u. Nervenfaser, I, p. 472, 1797). v. Humboldt zeigt bei der Wiederholung des Experiments, daß dieser „feine Staub“ auf der Silberplatte Wasserstoffblasen sind; darum nennt er dies Experiment: Wasserzersetzung durch den Galvanismus (l. c., p. 474). J. Ritter (1777—1810) führte dies Experiment so aus, daß er acht Wassertropfen auf eine Glasplatte brachte; in das Wasser ragten die Enden zweier verschiedener Metallstreifen; waren die freien Enden dieser Streifen unverbunden, so zeigte sich im Wasser nur sehr geringe Wirkung der Metalle; verband er aber die beiden Metallstreifen, so entstand dauernde Zersetzung, so daß an dem einen Metallstreifen Oxydation eintrat, an dem anderen lebhafte Wasserstoffentwicklung (Gilb. Ann 2, p. 80, 1799). Er zeigte auch, daß die hierbei tätige Elektrizität genau dieselbe sei, wie sie bei den Reibungsversuchen erzeugt werde, daß man also nicht eine besondere Flüssigkeit „Galvanismo“ annehmen könne für diese Versuche. Er spricht hier zum ersten Male die Hypothese aus, daß „diese entgegengesetzten Elektrizitäten auch für wirkliche Stimmung chemischer Prozesse sich ebenso entgegengesetzt verhielten“!

Diesen Gedanken hat Ritter zu einer Theorie des galvanischen Stromes ausgearbeitet: Bei der Berührung zweier Körper findet an der Berührungsstelle eine nach einer Richtung bestimmte „Aktion“ statt; sie ist elektrisch, aber durch den chemischen Charakter der beiden Körper bedingt. Sich entgegengesetzte Bestimmungsgründe für Aktionen von gleicher Größe heben einander auf; sind sie ungleich, so hebt der schwächere von dem stärkeren so viel auf, als er selbst beträgt. Die wirkliche Tätigkeit einer galvanischen Kette ist gleich der Differenz zwischen der Summe der nach einer Richtung bestimmten Aktionen weniger der Summe der nach entgegengesetzter Richtung bestimmten Aktionen. Z. B. in der Kette: „Frosch-Silber-Zink-Frosch-Zink-Silber-Frosch“ ist die Tätigkeit 0; wird die letzte Dreiheit fortgelassen, so ist die Tätigkeit = 1. Statt Frosch kann auch H_2O gesetzt werden. Die Aktion

folgender Kette: H_2O-Fe-Cu-H_2O-Sn-Ag-H_2O-MgO-Zn-H_2O-Kohle-Au-H_2O ist gleich (Zn-MgO-Aktion + Au-Kohle-Aktion) — (Fe-Cu-Aktion + Sn-Ag-Aktion). Ritter findet da auch Ketten aus einem Metall und zwei Flüssigkeiten, davon er mehrere angibt, am auffallendsten wohl diese: Opiumlösung-Kohle-Wasser (Beweis, daß ein beständiger Galvanismus den Lebensprozeß begleite, 1798, p. 76ff., z. gr. T. wiederholt in Gilb. Ann. 7, p. 431, 1801). Mit solchen Ketten hat Ritter die Wasserzersetzung so ausgeführt, daß er H und O einzeln auffängt und beide rein erhalten haben will. Er leitet auch beide Gase in einen Raum, durch welchen er den Funken schlagen läßt und so das Wasser wieder erhält, welches er zersetzt hatte (Beiträge z. näh. Kenntn. des Galvanismus, 1, p. 277, 1800). Dabei zeigte Ritter auch, daß Temperatursteigerung die Zersetzung sehr fördere. Und nicht nur Wasser zersetzte Ritter, auch andere Flüssigkeiten; er sagt: es gebe keine Flüssigkeit, die nicht unter gehörigen Umständen ihr Gas gebe. Aus Kupfersalzlösungen und Silbersalzlösungen schlug er Cu und Ag nieder. Also auch hierfür ist Ritter der Erfinder! Die Arbeiten von Carlisle und Nicholson (Journ. of Nat. Phil. 4, p. 179, 1800) und Cruickshank (ib., p. 187 u. 254) sind zum Teil erst angefangen, als Ritters Entdeckungen längst veröffentlicht waren (cf. Gilb. Ann. 6, p. 469, 1800), und zum Teil kamen sie nicht so weit, wie Ritter; ich gehe darum nicht weiter darauf ein.

Am 20. März 1800 schrieb Volta an Banks den ersten Brief, in welchem er die Säule und den Becherapparat beschreibt und zahlreiche Versuche mitteilt. Er baute die Säule so: ZnAg-Pappe-ZnAg-Pappe-... ZnAg, und meinte, die Stärke der Säule sei direkt proportional der Anzahl der Plattenpaare (Phil. Trans. 1800, p. 403). Banks gab den Brief vor der Veröffentlichung an Carlisle, der ihn Nicholson mitteilte, so daß diese ihre Versuche (s. oben) veröffentlichen konnten, ehe der Brief in der R. S. gelesen war (26. 6.). Auch Ritter arbeitet mit einer Säule von 64 Plattenpaaren; dabei findet er, daß die Doppelplatte am Anfang und am Ende überflüssig ist; es genügt eine Platte (Gilb. Ann. 7, p. 373, 1801). Das wird von Gilbert und Böckmann bestätigt. Jedoch Ritter geht noch weiter; er berechnet eine Kette Zn-H_2O-Ag-Zn-H_2O-Ag, die durch zwei Golddrähte mit einer Wasserzersetzungsröhre verbunden ist. Geht man von dieser aus, so ist der ganze Kreis: H_2O-Au-Zn-H_2O-Ag-Zn-H_2O-Ag-Au-H_2O. Gleichliegende „Bestimmungsgründe“ (Spannungen) sind Au-Zn und Ag-Zn, entgegengesetzt liegt Ag-Au, aber Au-Zn besteht aus Au-Ag + Ag-Zn; Au-Ag wird

durch Ag-Au aufgehoben, also bleibt 2 Ag-Zn als Wirkungsgrund für die Batterie übrig! Dieser Brief Ritters trägt das Datum 11. Mai 1801 (Gilb. Ann. 9, p. 219, 1801), ist also früher geschrieben und früher veröffentlicht als der Brief Voltas an J. A. Barth (Gilb. Ann. 9, p. 381, 1801), worin er die erste Andeutung des Spannungsgesetzes gibt. Also ist auch Ritter der erste Entdecker des Spannungsgesetzes; denn Voltas Brief ist am 29. August 1801 geschrieben; aber der Brief enthält das Spannungsgesetz selbst nicht, das wurde erst am 7. November in dem Nationalinstitut zu Paris veröffentlicht und gedruckt erst nach dem Bericht Biots im Namen der dazu erwählten Kommission (Gilb. Ann. 10, p. 392, 1802). Volta redet übrigens nicht von Spannung, sondern von Scheidungskraft, und denkt sich, daß an der Berührungsstelle eine Kraft wirkt, welche die Elektrizität von hier forttreibt an das andere Ende (ib., p. 436). Daß diese Vorstellung mit den Erfahrungen nicht vereinbar ist, zeigte erst Fechner (1801—1887; Lehrbuch d. Galvanismus, 1829, p. 200). Volta gab dann seine bekannte Spannungsreihe der Metalle: Zn—Pb = 5, Pb—Sn = 1, Sn—Fe = 3, Fe—Cu = 2, Cu—Ag = 1. Da er nun H_2O—Zn = 1 und H_2O—Ag = 1 fand, während letzteres 13 hätte geben müssen, so schied er die Leiter zweiter Klasse ab, für welche das Spannungsgesetz nicht gilt. Die Bezeichnung „Spannung des elektrischen Fluidums“ statt der Scheidungskraft Voltas ist von Biot, der Anhänger der Franklinschen Theorie war, in seinem Bericht gebraucht, daher der Name Spannungsgesetz. Die Voltasche Kontakttheorie ist jedoch durchaus nicht allgemein anerkannt; ihr trat die chemische gegenüber.

Chemische Wirkungen des Galvanismus.

Weder die Versuche Ritters noch Nicholsons und Carlisles waren geeignet gewesen, den zwingenden Beweis für die vollständige Zersetzung des Wassers zu geben. Davy (1778—1829) fand bei seinen Versuchen mit ausgekochtem Wasser auf der einen Seite 56 Maß H, auf der anderen 14 Maß O. Daß der fehlende Sauerstoff vom Wasser „verschluckt“ sei, bewies Davy, indem er nun das Wasser vor der Zersetzung mit Sauerstoff schüttelte, so daß es damit „gesättigt“ war. Jetzt zeigte der Versuch 57 Maß H und 27 Maß O, also nahezu das richtige Verhältnis (Nicholsons Journ. 4, p. 275 u. 326, 1800). Der Volumenmessung fügte Simon (1761 bis 1815) die Gewichtsbestimmung hinzu, wodurch er auch das richtige

Verhältnis von H und O bei der Zersetzung nachweisen konnte. Er wandte auch zuerst die U-förmig gebogene Glasröhre mit den eingeschmolzenen Elektroden bei der Wasserzersetzung an (Gilb. Ann. 8, p. 30, 1801; 10, p. 282, 1802).

Hand in Hand mit diesen Nachweisen geht die Untersuchung über die Vorgänge im Element (Säule) selbst. Ritter beobachtet an seiner Kette die „Ermüdung", welche er dadurch beseitigt, daß er die Elektroden herausnimmt und trocken abwischt (Gilb. Ann. 2, p. 80, 1799).

Wilson sieht, wenn er Zink- und Kupferspäne in ein Glas mit Wasser wirft, daß die Zinkspäne oxydiert werden und Wasserstoff entweicht (Nichols. Journ. 3, p. 147, 1800). Diese Beobachtung ergänzt Reinhold dahin, daß Kupfer in Wasser und Luft schwerer oxydiert wird, wenn es mit Zink in Berührung ist, weil dann an seiner Oberfläche H kondensiert ist (Gilb. Ann. 10, p. 309, 1802). Ohne den Zusammenhang zu ahnen, hatte schon A. v. Humboldt (l. c., p. 474) beobachtet, daß in einem Element Zn, H_2O, Ag die Zinkplatte oxydiert wurde und die Silberplatte mit H bedeckt war. Davy hoffte, im Becherapparat auch die Gasentwicklung zu finden, wenn er denselben kurz schloß, aber er sieht das Zn nur oxydiert und die Silberplatte mit Blasen von H bedeckt (l. c., p. 527). Er versucht nun, durch Zusatz zum Wasser diesen Wasserstoff zu verschlucken und die Oxydation am Zink zu beseitigen (erster Schritt zu konstanten Elementen). Daraufhin setzte Davy Elemente mit einem Metall und zwei Flüssigkeiten zusammen, z. B. Silber, flüssiges Schwefelkali, Wasser, oder Zinn, Säure, Wasser (Gilb. Ann. 11, p. 388, 1802).

Ich übergehe die z. T. irrtümlichen, z. T. unvollständigen Versuche, die von Ritter aufgeworfene Frage über den Vorgang der Zersetzung zu beantworten (s. Hoppe, Akkumulatoren, 3. Aufl., p. 11). Ritter selbst gibt folgende Antwort: Am Oxygendraht wird wirklich Wasser zersetzt; das Atom H, das im ersten Augenblick in unmittelbarer Nähe des Oxygendrahtes entsteht, entzieht dem unmittelbar an diesem Punkte liegenden, aber noch unzersetzten Atom Wasser seinen O und macht damit Wasser, während der hierdurch freigewordene H auf ähnliche Weise auf das dritte Wasseratom wirkt usw., bis das letzte Wasseratom am H-Draht zersetzt wird und nur freier H übrig bleibt. Diese Strahlen solcher Wirkung folgen einander dauernd; so entsteht ein kontinuierlicher Strom (Gilb. Ann. 9, p. 281, 1801). Denn er hatte beobachtet, daß bei der Wasserzersetzung in getrennten Gefäßen der verbindende Gold-

draht an seinen Enden O und H zeigte. Ebenfalls in dieser Arbeit macht Ritter schon die Bemerkung, daß die Stärke der Wasserzersetzung von der Distanz der Elektroden abhänge und daß man dieselben so weit voneinander entfernen könne, daß eine Gasentwicklung überhaupt nicht mehr nachweisbar sei (Voigts Mag. 2, p. 380, 1800).

Entsprechend diesen Ritterschen Versuchen zeigte Pfaff (1773—1852) in einem Briefe vom 25. Dez. 1801, daß auch bei Vergrößerung der Oberflächen der Platten eine Verstärkung der Wirkung eintrete, während die mit dem Elektrometer gemessenen Spannungen konstant blieben. Der Unterschied der Wirkung bei geschlossener Kette sei bedingt durch die verschiedene Leitungskraft der Flüssigkeitsschichten, die von der Größe der Oberfläche und der Natur derselben abhänge. Er beruft sich dabei auf Beobachtungen, die Volta (Gilb. Ann. 9, p. 491, 1801) gemacht hatte, ohne sie zu deuten (ib. 10, p. 234, 1802). Simon hatte bemerkt, daß durch die Vergrößerung der Platten die Funken beim Öffnen der Säule wesentlich verstärkt wurden, dagegen die physiologischen und chemischen Wirkungen keine Verstärkung erfuhren (ib. 9, p. 385, 1801). Graf Sternberg baute sich eine aus 80 Plattenpaaren von 3 Zoll Breite und eine aus 5 Plattenpaaren von 8 Zoll Breite bestehende Säule; letztere lieferte erheblich stärkere Funken als erstere, während die Erschütterung beim Schluß der Kette durch den eigenen Körper kaum zu spüren war (ib. 11, p. 132, 1802). Ritter fand bei einer Säule von 224 Plattenpaaren, daß das abschmelzende Silberplättchen stets am +-Pol abschmelze, während es am —-Pol unverletzt blieb; berührte er eine am +-Pol angebrachte Silberplatte mit einer am —-Pol befindlichen Kohle, so brannten Löcher in die Silberplatte; vertauschte er Silber und Kohle, so blieb das Silber intakt und von der Kohle lösten sich glühende Partikeln, so daß die Kohlenspitze rund wurde (ib. 9, p. 344, 1801, s. unten, De la Rive). Diese Fragen untersuchte Ritter genauer 1805. Er findet, daß bei einer gegebenen Anzahl Platten eine bestimmte Breite der Platten gefunden werde, wo die Wirkung der Platte in chemischer und erwärmender Wirkung das Maximum gebe; gehe man über dies Maß hinaus, so könne man wohl die Funken verstärken, aber nicht die chemische Wirkung, und vermehre man die Platten, so würden die Funken nicht stärker, sondern nur die chemische Wirkung. So kommt er zu dem Satz: „Der Effekt der Säule bei gleicher Spannung hängt ab von der Summe der Leitung in der Säule und dem schließen-

den Bogen" (ib. 19, p. 22, 1805). Die Bestätigung dieses Satzes fand erst Ohm!

Bei den Zersetzungsversuchen findet Erman (1764—1851), daß, je reiner das Wasser ist, desto geringer sein Leitungsvermögen, und mit dem Leitungsvermögen steht die Intensität der chemischen Wirkung in geradem Verhältnis (Gilb. Ann. 10, p. 1, 1802). Die gleiche Beobachtung hat Biot am 14. Aug. 1801 dem Nationalinstitut vorgetragen (ib., p. 24). Diese Beobachtungen blieben lange Zeit unbeachtet; wir kommen später darauf zurück. Dagegen wurden Ritters Beobachtungen über die Polarisation fortgeführt. Gautherot hatte die Wasserzersetzung durch zwei Platindrähte, die mit den Polen einer Säule in Verbindung waren, bewirkt; löste er diese Verbindung und berührte er die herausragenden Platindrähte mit der Zunge, so empfand er den bekannten Geschmack und eine schwache Erschütterung (Voigts Mag. 4, p. 713 u. 832, 1802). Er wollte damit einen Beweis gefunden haben für die Behauptung, daß Galvanismus etwas anderes sei als Elektrizität, hatte also gar nicht verstanden, was sein Versuch lehrte.

Anders Ritter; er setzte seine Untersuchung fort. Er verband die zur Zersetzung benutzten Golddrähte nach Trennung von der Säule miteinander und konstatierte einen schwachen Zersetzungsprozeß, doch so, daß an dem Draht, wo zuerst O entwickelt war, nun H erschien und umgekehrt. Dann legte er den oben erwähnten Verbindungsdraht zwischen zwei Zersetzungsgläsern mit den Enden an seine Zunge und empfand den Geschmack in umgekehrter Richtung. Das kann er bei allen anderen Metallen ebenso erreichen wie bei Gold, nur sind Zn, Sn und Pb ungeeignet, weil sie leicht oxydieren und diese Oxyde entweder abfallen, oder beim Haften doch recht schlechte Leiter sind. Durch häufige Wiederholung(!) des Experiments werden die Drähte immer geeigneter für solche Polarisation (Voigts Mag. 6, p. 104, 1803). Läßt man die Drähte nach Abtrennung von der Säule ungeschlossen liegen, so haben sie nach etwa einer halben Stunde die Polarisation verloren; schließt man gleich nach der Ladung, so liefern sie einen schnell abfallenden Strom; ist dessen Stärke nahezu = 0, so kann man nach kurzer Ruhepause in offenem Stromkreise eine „Erholung" feststellen, so daß von neuem ein schwächerer und kürzerer Strom geliefert wird. Das sind alles Erfahrungen, die bei Planté (s. unten) erst wieder auftauchen.

Auf Grund dieser Erfahrungen baut Ritter nun seine Ladungssäule aus 50 Kupferplatten von der Größe eines Talers, getrennt durch 49 kochsalznasse Pappscheiben; er lädt sie durch eine Voltasche

Säule, dann liefert die Ladungssäule Funken und chemische Zersetzung; durch letztere stellt er fest, daß die Stromrichtung in der Säule bei der Entladung entgegengesetzt ist der bei der Ladung (ib., p. 115). An dieser Säule konstatiert Ritter, daß eine Verdoppelung der Platten nicht eine Verdoppelung der Wirkung bedeute; durch Hinzufügen neuer Platten könne man schließlich dahin kommen, daß überhaupt keine Verstärkung der Wirkung mehr erreicht werde. Dagegen erhalte man große Verstärkung durch Vergrößerung der Oberflächen; so sei die Ladungssäule geeignet, Ansammlungs- und Verstärkungsapparat für die galvanische Elektrizität zu sein (ib., p. 182). Er faßte den Vorgang nach Art der Wilkeschen molekularen Polarisation auf; daß diese Erklärung falsch sei, zeigte Volta (Gilb. Ann. 19, p. 490, 1805) und führte die Ladung auf die Zersetzung des Wassers zurück, das Entweichen der Gase H und O wird durch die Pappscheiben gehindert. Ritter akzeptierte diese Erklärung (Allg. Journ. f. Chem. 3, p. 696) und fand weiter, daß man den Effekt der Säule bei gleicher Spannung abhängig finde von der Summe der Leitung in der Säule und dem Schließungsbogen (Gilb. Ann. 19, p. 22, 1805).

Bei Wiederholung der Ritterschen Versuche mit Silberplatten fand Brugnatelli die Okklusion der Gase durch die Silberplatte (Journ. de Phys. 62, p. 298). Er meinte freilich, die „schwammige Substanz“ sei eine Verbindung des Silbers mit H_2O.

Ritter hat seine oben angegebene Theorie der Wasserzersetzung selbst aufgegeben und eine Oxygenisierung und Hydrogenisierung des Wassers infolge eines falsch verstandenen Experiments an die Stelle gesetzt, die von vielen Zeitgenossen angenommen wurde und noch bis 1816 spukte. Die erste Rittersche Theorie wurde von v. Grotthuß wieder aufgenommen (Mém. sur la décomp. de l'eau etc., 1805, s. Ann. de chim. 58, p. 54, 1806). Er wandte sie auf Lösungen an und erklärte damit die Metallniederschläge, besonders die Dendriten. Die erste Beobachtung von Dendriten an einer —-Silberelektrode beobachtete Grunert und erklärte sie durch eine Desoxydation (Gilb. Ann. 8, p. 218, 1801. Später hat Grotthuß diese Theorie ausführlich noch einmal auseinandergesetzt und angewandt (Phys.-chem. Forschungen, I, p. 115, 1820).

Während sie von den meisten gar nicht beachtet wurde, nahm Davy dieselbe auf und stellte sie fast mit denselben Worten dar (Phil. Trans. 1807, p. 1, und Gilb. Ann. 28, p. 38, 1808): Der Wasserstoff, die alkalischen Substanzen, die Metalle und gewisse Metalloxyde werden von den negativ elektrisierten Metallflächen an-

gezogen, von den positiven abgestoßen usw. Diese anziehenden und abstoßenden Kräfte sind energisch genug, um die gewöhnlichen Wirkungen der Wahlverwandtschaft zu stören oder zu hemmen. . . . Diese Kräfte wirken von Teilchen zu Teilchen, so daß diese Teile in der Flüssigkeit eine Leitung bilden und so hinübergeführt werden. Bei diesem Hinüberführen kann zweierlei eintreten: Da die Zersetzung von beiden Metallplatten ausgeht, können entweder von beiden Seiten solche Teilchenreihen ganz hinüberreichen, oder man kann annehmen, daß sich zwei in entgegengesetzter Richtung sich bewegende Teilchen in der Mitte treffen und nun wieder ein Molekül der Substanz, die zersetzt werden soll, bilden. — Dann spricht Davy allen Körpern (Elementen) einen bestimmten elektrischen Charakter zu, da sie ja in dem Voltaschen Fundamentalversuch entweder + oder — gefunden werden. Diesen Charakter behalten sie auch in Verbindungen mit anderen Elementen, aber diese Kräfte zeigen ihre Wirksamkeit nur in bezug auf andere Körper. So ist O in bezug auf Metalle —, H aber +; wie O verhalten sich alle Säuren, wie H alle Alkalien. Auf diese Weise erklärt Davy nicht nur die Zersetzung, sondern auch die Wahlverwandtschaften. Körper, die sich einem dritten gegenüber gleichartig verhalten, unterscheiden sich durch die Stärke der Anziehung und Abstoßung. Der Vorgang im galvanischen Strome ist also so aufzufassen, daß die elektrischen Kräfte beim Kontakt das Gleichgewicht stören, während die chemischen Veränderungen dasselbe wieder herzustellen berufen sind, wobei denn die Zersetzungsprodukte einen Transport von der einen Elektrode zur anderen erleiden (l. c., p. 161).

Elektrolyse

Daß diese Zersetzungstheorie so großen Beifall fand, ist wohl begründet durch die außerordentlichen Erfolge, die Davy in der Zersetzung von Lösungen fand. Die auffallendsten waren die Zersetzung des Ätzkalis und des Natriumhydroxyds. Er schmolz in einem mit dem +-Pol der Säule verbundenen Platinlöffel Ätzkali, tauchte in die Schmelze einen —-Platindraht und sah nun an diesem kleine metallglänzende Kugeln, die sich an der Luft sofort wieder mit O verbanden und auf Wasser mit heller Flamme explosiv sich mit Sauerstoff vereinigten. Er bewahrte daher die Kugeln unter rektifiziertem Öl auf; analog fand er das Natrium (Gilb. Ann. 28, p. 148, 1808). In der Folge gelang es ihm, aus Chlorbarium das Barium, aus Chlorstrontium das Strontium, aus

Chlorcalcium das Calcium herzustellen. Eine ausgiebigere Methode, diese Metalle zu gewinnen, hat Seebeck erfunden. Er legt ein Stück Ätzkali auf ein Platinblech, höhlt das Ätzkali etwas aus und gießt in dies Loch Quecksilber. Verbindet er das Platin mit dem +-Pol und das Quecksilber mit dem —-Pol, so verbindet sich das entstehende Kalium mit dem Hg zu einem Kaliumamalgam, welches beständig ist. Glüht man dieses unter Luftausschluß in einem Gefäß, so verdampft das Hg und K bleibt zurück (Gilb. Ann. 28, p. 476, 1808).

Die Theorie Davys erfuhr Widerspruch durch Berzelius (1779—1848). Da die Körper, auch die Radikale, an sich unelektrisch sind, so, sagt er, entsteht die positive und negative Elektrizität erst bei ihrer Verbindung, so daß das eine ebenso stark + wie das andere — wird, analog wie die Berührungselektrizität im Voltaschen Fundamentalversuch. Jedes Radikal hat gleiche Mengen +- und —-Elektrizität in sich. Bei der Berührung verliert jedes Radikal die eine Art, z. B. der H verliert seine negative, der O seine +-Elektrizität bei der Verbindung zu H_2O, so daß im Wassermolekül der H +, der O — bleibt (Schweigg. Journ. 6, p. 120, 1812). Dann stellt Berzelius eine elektrochemische Reihe auf nach Art der Voltaschen Spannungsreihe mit dem am meisten —-Radikal = O an der Spitze (Gilb. Ann. 42, p. 45, 1812; Lehrbuch 1843, p. 118). Wie man diese +- und —-Elektrizität in dem freien Radikal vorstellen soll, malt Ampère in einem Briefe an von Beck aus (Journ. de Phys. 1821, p. 450). Ein Sauerstoffteilchen ist an sich —-elektrisch, zersetzt daher das umgebende neutrale Fluidum, d. h. zieht aus der Umgebung +-Elektrizität an und stößt die — ab; so umgibt es sich mit einer +-Atmosphäre und erscheint daher neutral; mit entgegengesetzten Elektrizitäten ist der Vorgang beim H geradeso. Nähern sich die beiden bei der Wasserbildung, so haben sich die beiden Atmosphären gegenseitig entladen und es bleiben die ursprünglichen charakteristischen Elektrizitäten bei den das Molekül bildenden Radikalen übrig. Ähnlich stellt sich Fechner den Vorgang vor, indem er noch auf die bei solchen Verbindungen eintretenden Feuererscheinungen hinweist (Pogg. Ann. 44, p. 37, 1838). De la Rive (1801—1873) baute eine auf Biots Galvanique gegründete Theorie auf (Ann. de Chim. et de Phys. 28, p. 201, 1825), die, von Becquerel übernommen (ib., Ser. 3, 11, p. 162 u. 257, 1844), in Frankreich längere Zeit maßgebend war. Danach würde bei der Zersetzung einer binären oder ternären Verbindung für ein Äquivalent Elektrizität (= Galvanique) ein Äquivalent des sauren

Bestandteils zum +-Pol und die entsprechende Menge des basischen Bestandteils zum —-Pol befördert. Pouillet ergänzte diese Ansicht noch dadurch, daß nur der —-Pol chemisch wirksam sei (C. R. 1845, 26. 5.), weil er beobachtet hatte, daß in einer gebogenen Glasröhre mit Diaphragma die Goldchloridlösung auf der Seite der negativen Elektrode des Goldes beraubt war, aber nicht auf der positiven!

Der Transport des Elektrolyten durch den Strom ist zum ersten Male von Reuß gesehen (Mém. Moskau 2, p. 327, 1809) im Sinne des +-Stromes; er will dagegen in dem Wasser suspendierte Teilchen mit dem —-Strome wandern gesehen haben, während Becquerel (s. unten) auch diese im Sinne des +-Stromes sich bewegen sah. Ausführlich ist dies beobachtet von Porret (Ann. of Phil. 1816, Juli). Er hatte den Zersetzungstrog durch eine tierische Membran geteilt, aber beide Seiten mit Wasser gefüllt, da beobachtete er, daß auf der Seite des negativen Pols ein Überdruck entstand. Er untersuchte mehrere Flüssigkeiten und fand, daß alle nicht zersetzbaren Flüssigkeiten diesen Transport zur —-Elektrode erlitten. Schon früher hatte Wollaston für den tierischen Organismus einen solchen Transport durch den galvanischen Strom nachzuweisen gesucht (Gilb. Ann. 36, p. 1, 1810). Porrets ausgedehnte Untersuchung ist dann fortgesetzt (ib. 64, p. 272, 1820). Statt der tierischen Membran wandte Becquerel zuerst einen porösen Tonzylinder an, anfangs, um Elemente mit zwei Flüssigkeiten und einem Metall herzustellen: Salpetersäure, Kalilauge, Platin (Ann. de Chim. et de Phys. 23, p. 244, 1823), später, um auch den Durchtransport der Flüssigkeit durch diese poröse Scheidewand zu beobachten, die „elektrische Endosmose“. Dabei fand er bei Schwefelsäurelösung keinen Überdruck, wohl aber bei Salzlösungen (Traité de l'Électr. 3, 1835). Nur nebenbei hat sich Daniell mit dieser Endosmose beschäftigt (Pogg. Ann., Erg. I, p. 569, 1842). Sie ist sorgfältig studiert von G. Wiedemann (Pogg. Ann. 87, p. 321, 1852) mit dem Ergebnis, daß die Menge der in gleichen Zeiten durch den Strom in den Tonzylinder hineingeführten Flüssigkeit direkt proportional ist der Intensität des Stromes, aber unabhängig von der Dicke der Tonwand und proportional den spezifischen Widerständen. Im übrigen bestätigt er Becquerels Erfahrung über die Schwefelsäure.

Eine gewisse Konfusion ist in diese Frage gebracht durch Napier, welcher sichtbare und unsichtbare Endosmose unterschied, wo er mit sichtbarer die meinte, welche die anderen auch Endosmose

nannten, mit unsichtbarer aber die Konzentrationsänderung, welche er als Mitführung der Salzteile auffaßte (Phil. Mag. 1846, Juli). Soviel ich sehe, ist von dieser Definition nur in einigen englischen Arbeiten Gebrauch gemacht. Während in allen bis dahin angestellten Versuchen die Bewegung der Flüssigkeit im Sinne der +-Elektrizitätsbewegung stattfand, sind, abgesehen von einigen zweifelhaften Versuchen, von Quincke Beobachtungen gemacht, daß absoluter Alkohol sich entgegengesetzt bewege (Pogg. Ann. 113, p. 168 u. 513, 1861); auch benutzte er die Entladung einer Kleistschen Batterie als Stromquelle. Genauer messende Versuche sind von Freund (Wied. Ann. 7, p. 51, 1879) und von Dorn (ib. 10, p. 70, 1880) angestellt. Eine Theorie dieser Erscheinungen gab Helmholtz (Wied. Ann. 7, p. 351, 1879), die im wesentlichen durch messende Versuche von Saxén bestätigt ist (ib. 47, p. 46, 1892).

Die oben angegebenen Theorien über die Zersetzung gingen von der Vorstellung aus, daß die Salze binäre Verbindungen aus Säure und Basis seien. Daniell (1790—1845) zeigte durch seine Elektrolyse, daß das nicht richtig sei, daß man also schwefelsaures Natron nicht zerfallen sehe in $SO_3 + Na_2O$, sondern in $SO_4 + Na_2$, daß aber neben diesem primären Akt der Zersetzung ein sekundärer in der Flüssigkeit nebenher gehen könne durch den Einfluß des Wassers auf die Zerfallsteile des Salzes. Das Wasser selbst aber habe an der Zersetzung durch den Strom keinerlei Anteile (Phil. Trans. 1839, I, p. 97, und 1840, I, p. 209). Hier also tritt zum ersten Male das Metall und der Säurerest als Ionen auf. Damit war die Berzeliussche Theorie nicht vereinbar. Den Einwand, daß man das Ion SO_4 nicht nachweisen könne, wollen Daniell und Miller dadurch beseitigen, daß dieser Atomkomplex, den sie Oxysulphion genannt hatten, an der positiven Elektrode von selbst zerfalle (ib. 1844, p. 1). Sehr ausführlich beschäftigt sich Buff (1805—1878) mit dieser Daniellschen Entdeckung, sie bestätigend und erklärend (Ann. d. Chemie u. Pharmazie 85, p. 1; 105, p. 145; 106, p. 203). Die Daniellsche Erklärung der Zersetzung ist der Abschluß von Untersuchungen, die sich wesentlich an den Namen Faraday (1791 bis 1867) knüpfen.

Faradays elektrolytische Arbeiten werden eingeleitet durch eine Untersuchung über den Einfluß des Aggregatzustandes und der Temperatur auf das Leitvermögen im Jahre 1834; alle Arbeiten sind in seinen Experiment. researches veröffentlicht von Ser. 4 bis Ser. 17 und durchweg in Pogg. Ann. übersetzt; ich zitiere nach Paragraphen, da die Seitenzahlen in den verschiedenen Ausgaben

nicht übereinstimmen. Seine ersten Versuche gehen nicht wesentlich über das hinaus, was Davy schon festgestellt hatte. Dabei muß erwähnt werden, daß Davy eine Zeitlang von seiner gesunden Bahn abgeirrt war, indem er meinte, das Wasser sei durchaus notwendig zur Zersetzung und nehme an ihr primär teil (Elem. of chem. Phil. 1812, p. 169). Gegen diese Meinung polemisiert Faraday, aber er glaubt doch, daß Wasser auch ein Beispiel für die Zersetzung sei. Faraday führt für die Elektrolyse die bis heute beibehaltene Nomenklatur ein (VII, § 662—665). Er nennt die Flächen, durch welche der Strom ein- und austritt, Elektroden und die Eintrittsfläche Anode, die Austrittsfläche Kathode. Wir pflegen nicht die Flächen, sondern die Körper, durch welche der Ein- und Austritt bewirkt wird, mit diesem Namen zu bezeichnen. Der zu zersetzende Körper heißt Elektrolyt, die Zersetzungsprodukte Ionen, und zwar das zur Anode gehende Ion Anion, das zur Kathode gehende Kation.

Faraday wendet sich zunächst gegen die Meinung, daß die Zersetzung von den Elektroden ausgehe; er sagt, es ist ganz gleichgültig, wie der Strom in den Elektrolyten hineinkommt, die chemische Kraft des Stromes ist überall in dem Elektrolyten dieselbe und die Menge der Zersetzung hängt lediglich von der Menge der durchgehenden Elektrizität ab, so daß die Summe der chemischen Zersetzungen in jedem beliebigen Querschnitt der Strombahn die gleiche ist und nur von der Intensität des Stromes, nicht aber von der Distanz von den Elektroden abhängt. So ist die Leitungsfähigkeit der Flüssigkeit geradeso groß wie seine Zersetzungsfähigkeit. Damit hat Faraday Ideen als richtig bewiesen, die schon bei Ritter ausgesprochen waren, und seine Auffassung über die Stromleitung im Elektrolyten deckt sich ziemlich vollständig mit der, welche Gmelin (Pogg. Ann. 44, p. 1 u. p. 30, 1838) über die Zersetzung hatte: Die Affinität des Zn zum O bewirkt, daß sich die Sauerstoffatome der zunächstliegenden Wassermoleküle dem Zn zukehren; diese Stellung der Atome pflanzt sich vom Zn bis zum Cu durch die Flüssigkeit fort; der zweite Akt ist, daß sich das O-Atom mit einem Zn-Atom der Elektrode vereinigt; der dadurch freiwerdende H vereinigt sich mit dem O des nächsten Wassermoleküls wieder zu Wasser, und das geht durch die Flüssigkeit, bis das letzte H-Atom am Cu frei wird. Nun erfolgt wieder eine Ordnung der Wassermoleküle wie zuerst, indem sich dieselben um 180^0 drehen. Der am Cu freiwerdende H nimmt aus der Kupferplatte ein gleiches Quantum —-Elektrizität, wie er selbst an +-Elektrizität besaß, um so neutral zu entweichen. Dadurch entsteht

auf der Cu-Platte ein Überschuß von +-Elektrizität, der dann in den Verbindungsdraht mit dem Zn-Pol als strömende Elektrizität übergeht. So erklärt Gmelin die Stromerzeugung im Element in Erinnerung an die Grotthußsche Theorie (Pogg. Ann. 44, p. 1, 1838), und analog verläuft die Zersetzung, indem die +-Elektrizität der Anode zunächst auch die polare Anordnung der Moleküle bewirkt und dann die Zersetzung durch Vereinigung des O mit dem +-Quantum der Anode usw. Freilich hatte Gmelin eine sehr materielle Vorstellung von der Elektrizität selbst; sie bestehe aus zwei Flüssigkeiten, die mit gegenseitiger Affinität begabt sind und bei ihrer Vereinigung Wärme erzeugen usw.

Gegen diese materialistische Auffassung wendet sich Faraday. Der elektrische Strom ist an axis of power having contrary forces, exactly equal in amount, in contrary directions (V, § 517), und er warnt eindringlich davor, den Strom als etwas Fließendes anzusehen, auch wenn man es imponderabel nenne (XIII, § 1617). Die Elektrolyse stellt sich Faraday nun so vor: Es scheint, daß der Effekt hervorgebracht wird durch eine in Richtung des elektrischen Stromes ausgeübte innere Korpuskularaktion, und daß sie herrührt von einer Kraft, die entweder der gewöhnlichen chemischen Affinität der vorhandenen Körper hinzutritt oder dieser Richtung verleiht. Der sich zersetzende Körper kann betrachtet werden als eine Masse wirkender Teilchen, von denen alle die, welche in dem Laufe des elektrischen Stromes liegen, zu der Endwirkung beitragen; und dadurch, daß die gewöhnliche chemische Affinität durch den Einfluß des elektrischen Stromes in der einen Richtung verringert oder teilweise neutralisiert, in der anderen verstärkt und unterstützt wird, geschieht es, daß die verbundenen Teilchen eine Neigung haben, entgegengesetzte Wege einzuschlagen. Dabei muß vorausgesetzt werden, daß die Atome der elektrolytischen Moleküle an und für sich eine Wirkung auf die Atome benachbarter Moleküle ausüben, doch nicht von der gleichen Stärke, wie auf die, mit welchen sie in einem Molekül verbunden sind. Die Wirkung des Stromes bezieht sich dann auf die Abänderung dieses Verhältnisses, so daß die Ansammlung der Zersetzungsprodukte an den Elektroden nicht Folge einer von letzteren ausgeübten Anziehungskraft, sondern die Folge einer Ausstoßung seitens der in Zersetzung begriffenen Massen ist. Daraus folgt, daß die zersetzte Menge stets proportional ist der durchgegangenen Elektrizitätsmenge. Den Satz sprach Faraday zunächst für Wasser aus, dehnte ihn dann aber auf alle Elektrolyten aus (VII, § 821).

Die Ergebnisse seiner Versuche sind in folgende acht Sätze zusammengefaßt: 1. Ein einzelnes, mit keinem anderen verbundenes Ion geht zu keiner Elektrode, es ist indifferent gegen den Strom. 2. Wenn ein Anion mit einem Kation im richtigen Verhältnis verbunden ist, so werden beide wandern, das eine zur Anode, das andere zur Kathode; es muß also stets, wenn ein Ion zu einer Elektrode geht, ein anderes zur anderen gehen. 3. Unter Körpern, aus denselben zwei Ionen zusammengesetzt, gibt es nur einen Elektrolyten, gemäß dem Gesetz, daß die elementaren Ionen nur in gleich viel elektrochemischen Äquivalenten und nicht in Multiplis derselben zu den Elektroden gehen. 4. Ein für sich nicht zersetzbarer Leiter wird auch in Verbindungen nicht zersetzt, sondern kann nur als ein Ion wirken und als Ganzes zu einer Elektrode gehen, er kann aber durch eine sekundäre, rein chemische Aktion zersetzt werden. 5. Die Natur der Elektroden, vorausgesetzt nur, daß sie leitend sind, bewirkt keinen Unterschied in der elektrochemischen Aktion, weder in der Art noch in deren Grad; aber einen starken Einfluß hat sie vermöge sekundärer Aktion auf den Zustand, in welchem die Ionen zuletzt erscheinen. Daher kann man die Ionen unter Umständen im verbundenen Zustand auffangen, wenn sie im freien nicht behandelbar sein würden. 6. Eine Substanz, welche als Elektrode sich ganz mit dem an ihr entwickelten Ion verbindet, ist selbst ein Ion und verbindet sich in dergleichen Fällen in der durch ihr elektrochemisches Äquivalent festgestellten Menge. 7. Zusammengesetzte Ionen sind nicht notwendig zusammengesetzt aus elektrochemischen Äquivalenten einfacher Ionen. 8. Elektrochemische Äquivalente sind immer übereinstimmend, d. h. stets die gleiche Zahl, und sind gleich den gewöhnlichen chemischen Äquivalenten (§ 826ff.). Dies letztere Gesetz fand er am 31. Dez. 1833 (VII, § 783) und bezeichnet es selbst als law of definite action.

Die heute übliche Fassung dieses Grundgesetzes lautet nach v. Helmholtz: Ein Strom von bestimmter Stärke macht in den verschiedenen Elektrolyten gleich viele Valenzen frei, oder führt sie in andere Kombinationen über (Wied. Ann. 3, p. 201, 1878). Bei Faraday ist der Strom also lediglich das Produkt chemischer Aktionen. Der Kontakt hat nichts mit der Erzeugung des Stromes zu tun (VIII, § 915), und an anderer Stelle sagt er: Ich bin jetzt für die Meinung De la Rives und glaube, daß in der Voltaschen Säule der bloße Kontakt nichts zur Erregung des Stromes beiträgt (XVI, § 1801), oder: Wenn die chemische Aktion, welche einen Strom in der einen Richtung erzeugt hat oder erzeugen konnte,

umgekehrt oder vernichtet wird, wird auch der Strom umgekehrt oder vernichtet (XVII, § 2040). Den gleichen Ausspruch hatte schon Heidmann in einer sonst viel Unrichtiges enthaltenden Arbeit im Anschluß an Ritters Experimente getan (Gilb. Ann. 10, p. 52, 1802). Dies Beiseiteschieben der Kontaktkraft hindert Faraday, eine Erklärung der Stromerzeugung zu geben, und auf die Frage, warum denn die Zersetzung in der Zersetzungszelle nur erfolge, wenn die Elektroden mit einer Stromquelle verbunden sind, antwortet er: Die elektrische Ladung der Elektroden besorgt nur den Polarisationszustand des Elektrolyten (XII, § 1345). Also das gleiche wie bei der Influenz in einem Dielektrikum!

Um die offensichtlichen Schwächen der Faradayschen Theorie zu vermeiden, versuchte R. Kohlrausch eine andere Vorstellung (Pogg. Ann. 97, p. 392, 1856). Alle Elemente haben gleich viel +- und —-Elektrizität. Als die Bestandteile des Wassers sich verbanden, gab der H $-q$ an den O, und O $+q$ an den H. Also hat ein Wassermolekül $+2q$ im H und $-2q$ im O. Soll der H frei als neutrales Gas entweichen, so muß er $+q$ abgeben und $-q$ aufnehmen. Das geschieht an der Elektrode, an der anderen ist der Vorgang mit dem O analog, nur mit entgegengesetztem Vorzeichen, so daß durch den Leitungsdraht $+q$ und $-q$ in entgegengesetzter Richtung fließen. Im Elektrolyten aber gehen $+2q$ des abgetrennten H von dem einen Molekül des Wassers zum Nachbarmolekül; aber auf halbem Wege treffen sie mit $-2q$ des von jenem abgeschiedenen O zusammen, so daß die Stromstärke im Draht und im Elektrolyten stets dieselbe bleibt (ib., p. 564). Es ist hier also eine Umbildung des Berzeliusschen Gedankens vorgenommen, aber Faraday wie Kohlrausch halten das Wasser noch für einen Elektrolyten, obwohl sie beide sekundäre Wirkungen kennen.

Es ist auffallend, daß Daniells Nachweis so wenig beachtet wurde; erst durch Hittorfs Arbeiten trat da ein Wandel ein. Vorher sind aber einige Resultate von Magnus von Bedeutung. Er untersuchte zusammengesetzte Lösungen, die mehrere Metallsalze enthielten; da findet er, daß der Strom bei einer gewissen Stärke nur eines der Salze zersetzt. Diese Intensitätsgrenze entspricht dem Maximum von Elektrizität, welches an diese Substanz bei der Zersetzung übergehen kann. Die Leitung im Elektrolyten erklärt er im Faradayschen Sinne. Es bedarf stets derselben Kraft, um eine einfache Substanz aus einer Verbindung zu lösen. Um die Tatsache zu erklären, daß bei gleicher Stromstärke aus den Chlorüren doppelt so viel Metall abgeschieden wird wie aus den

Chloriden des Zinns, Kupfers usw. nimmt Magnus an, daß die chemischen Äquivalente andere seien als die galvanischen; z. B. soll Jodsäure chemisch J + 5 O, galvanisch dagegen $^1/_5$ J + O sein. Da auch er das Wasser primär zersetzen läßt, nimmt er für die Zersetzung der Lösungen auswählende Zersetzung an (Pogg. Ann. 102, p. 1, 1857 und 104, p. 553, 1858). Alle diese Forscher hatten die Wanderung der Zersetzungsprodukte, die auch von Daniell wieder nachgewiesen war (ib. 64, p. 39, 1845), nicht beachtet.

Da setzt die große Arbeit Hittorfs (1824—1914) ein mit dem Jahre 1853. Die in Pogg. Ann. zuerst veröffentlichten Untersuchungen sind gesammelt in Ostwalds Klassikern 21 u. 23. Zunächst stellt Hittorf bei einer sehr großen Anzahl von Lösungen fest, daß überschüssige Äquivalente der Ionen an den Elektroden auftreten, und so scheint es, als ob das Faradaysche Gesetz nicht richtig sei. Er findet, daß diese Abweichung erklärbar ist durch die Wanderung der Ionen, sobald man annimmt, daß dieselben verschiedene Geschwindigkeiten haben. Wenn wir den Molekularabstand = 1 setzen, so möge das erste Ion bis zum Zusammenstoß mit dem entgegengesetzten Ion des benachbarten Moleküls $\frac{1}{m}$ des Molekularabstandes durchlaufen haben, dann hat das zweite Ion in entgegengesetzter Richtung $\frac{m-1}{m}$ Molekularabstände durchlaufen. Für alle Lösungen, wo $m > 1$ ist, sind dann die Beobachtungen erklärt. Sobald aber $m < 1$ ist, reicht diese Erklärung nicht aus. Hittorf findet solche Elektrolyten im Jodcadmium, Chlorcadmium, Jod- und Chlorzink. Um auch hier zu einem befriedigenden Resultat zu kommen, nimmt er an, daß diese Körper Doppelsalze seien. Bei starker Verdünnung hört jedoch dieser Charakter der Doppelsalze auf und sie gehorchen dann dem allgemeinen Gesetz. Das Ergebnis dieser Untersuchung läßt sich in folgende Sätze zusammenfassen: Die veränderte Konzentration an den Elektroden ist bedingt durch die Bewegungen, welche die Ionen zwischen den unveränderten Schichten vollbringen. Die Überführungszahlen drücken die relativen Wege aus, welche an der Trennungsstelle die Ionen in dem die Salzmoleküle trennenden Abstande zurücklegen, oder die relativen mittleren Geschwindigkeiten, welche sie daselbst besitzen.

Das Los, welches die Ionen an den Polen erfahren, braucht bei der Bestimmung der Überführung nicht beachtet zu werden und hat keinen Einfluß auf die Zahlen, vorausgesetzt, daß dadurch keine Unterbrechung des Stromes herbeigeführt und die Lösung

an der Trennungsstelle nicht geändert wird. Die von Hittorf in seinen Resultaten angegebenen Überführungszahlen n sind die Werte von $1/m$. Bezeichnet man dann die Geschwindigkeit, mit welcher das Anion fortgeschoben wird, mit V, die des Kations mit U, so ist $\frac{U}{V} = \frac{1-n}{n}$.

Diese grundlegenden Arbeiten wurden erst durch Fr. Kohlrausch (1840—1910) weitergeführt in den seit 1875 begonnenen zahlreichen Untersuchungen über das Leitvermögen wäßriger Lösungen, die sich bis 1898 auf mehr als 50 Stoffe in 260 Lösungen erstreckten. Um störende Einflüsse der Polarisation möglichst zu vermeiden, benutzte Kohlrausch Wechselströme von einem Sinusinduktor oder einem Wagnerschen Hammer; denn er hatte gezeigt, daß auch bei den alternierenden Strömen Polarisation stattfindet und hatte gelehrt, wie man sie messen kann (Pogg. Ann. Jub., p. 290, 1874; Wied. Ann. 6, p. 1, 1879; 11, p. 653, 1880). Kohlrausch führte nun statt der Angabe des Prozentgehalts, der für die Elektrolyse nicht das Entscheidende ist, die in der Volumeinheit enthaltene Anzahl von zersetzbaren Molekülen, die Molekülzahl oder den „Molekulargehalt“, ein. Also die in 1 Liter Lösung enthaltene Anzahl Gramm des Elektrolyts, dividiert durch das elektrochemische Äquivalentgewicht, ist $= m$. Lösungen, die das gleiche m haben, nennt er äquivalent. Dann ist das Leitungsvermögen

$$\varkappa = \lambda m - \lambda' m^2 ,$$

wo λ und λ' Konstanten der Substanz sind. Bei großer Verdünnung ist $\lambda' m^2$ sehr klein; dann setzt er für $\lambda = \frac{\varkappa}{m}$ den Namen molekulares Leitungsvermögen fest. In verdünnten Lösungen hängt dies nur von den wandernden Bestandteilen ab, d. h. von dem Widerstand, den dieselben in dem Elektrolyten als Reibung an den Molekülen erleiden. Da nach Ritters erster Theorie jedem Ion ein bestimmtes Quantum Elektrizität ε zukommt und nach der Hittorfschen Bezeichnung die Ionen sich mit den Geschwindigkeiten U und V bewegen, so ist das molekulare Leitvermögen $\lambda = u + v$, wo $u = \varepsilon U$, $v = \varepsilon V$ ist. So ergibt sich das Gesetz der unabhängigen Wanderung der Ionen in verdünnten Lösungen. Aus den Messungen ergibt sich weiter das Gesetz, daß das molekulare Leitungsvermögen mit der Verdünnung wächst und bei einer bestimmten Grenze das Maximum erreicht. Endlich das Gesetz, daß die Elektrolyte erst Leiter für die Elektrizität werden, wenn sie in einer Lösung bzw. Mischung sind (Pogg. Ann. 154, p. 215,

1875; 159, p. 233, 1876; Wied. Ann. 6, p. 1 u. 145, 1879; 26, p. 161, 1885). Kohlrausch fand, daß die Leitungsfähigkeit der von ihm untersuchten Lösungen mit steigender Temperatur wächst. Aber es gibt auch solche mit fallender Leitfähigkeit, wie Arrhenius fand (Ztschr. f. phys. Chem. 4, p. 96, 1889); bei diesen verbrauchen die Ionen bei ihrer Vereinigung zu neutralen Molekülen Wärme. Durch Ostwald ist die Kohlrauschsche Formel auch für mehrwertige Ionen brauchbar gemacht (Ostwald, Lehrb. d. allg. Chem. II_1, p. 673.

Dissoziation.

Die weiteren Fortschritte hängen zusammen mit der Erforschung der Lösungen. Bei der Endosmose wurden von Traube (Arch. f. Anat. u. Physiol. 1867, p. 87) semipermeable Membranen wieder entdeckt, die wohl das Lösungsmittel, aber nicht den gelösten Körper durchlassen. Durch Pfeffer (Osmotische Unters. 1877) wurde der osmotische Druck eingeführt. Er findet, daß dieser Druck proportional ist der Konzentration C und absoluten Temperatur T und umgekehrt proportional dem Volumen. Er sagt: Mengen gelöster Stoffe, welche im Verhältnis der Molekulargewichte stehen, üben, zu gleichem Volumen gelöst, bei gleicher Temperatur gleichen Druck aus. Dem fügte van't Hoff (1852—1911) den Satz hinzu: Gelöste Stoffe üben in der Lösung denselben Druck als osmotischen aus, den sie bei gleicher Temperatur und im gleichen Volumen als Gas ausüben würden (Wet. Hand. Stockholm 21, p. 58, 1886). Aus den zahlreichen Untersuchungen hat sich das Resultat herausgebildet: Werden in gleichen Gewichtsmengen desselben Lösungsmittels äquimolekulare Lösungen beliebiger Stoffe hergestellt, so haben dieselben: 1. gleichen osmotischen Druck, 2. gleiche relative Dampfdruckverminderung, 3. gleiche Schmelzpunktserniedrigung, 4. gleiche Siedepunktserhöhung. Dem gehorchen alle indifferenten Lösungen, aber sämtliche Elektrolyte nicht. Um diesen Fehler zu beseitigen, mußte van't Hoff dem Gasgesetz, welches auch für die Lösungen gelten sollte, den Faktor i hinzufügen, also $p \cdot v = i \cdot R \cdot T$, wo i bei starker Verdünnung (Kohlrausch) sich den ganzen Zahlen nähert. Für Nichtelektrolyte ist $i = 1$.

Zur Erklärung dieser Anomalie nimmt Arrhenius an, daß in der elektrolytischen Lösung eine Anzahl Moleküle zerfallen sind, so daß i das Verhältnis des wirklich ausgeübten Druckes der Lösung zu dem Druck, wenn gar keine Moleküle dissoziiert sind, darstellt, und das Maximum der Leitfähigkeit ist vorhanden, wenn

alle Moleküle dissoziiert sind (Ztschr. f. phys. Chem. 1, p. 631, 1887). Von ganz anderen Gesichtspunkten aus, nämlich aus der Betrachtung über die Entropie, kommt Planck zu der gleichen Forderung der Dissoziation (Wied. Ann. 32, p. 499, 1887), unabhängig von und gleichzeitig mit Arrhenius. Dieser führt nun auf dieser Grundlage folgendes aus: Nur dissoziierte Moleküle nehmen an der elektrischen Leitung teil, für jede verdünnte Lösung muß das Dissoziationsverhältnis gleich dem Verhältnis der vorhandenen molekularen Leitfähigkeit zu der Leitfähigkeit bei unendlicher Verdünnung (wo alle Moleküle dissoziiert sind) sein. Da die Ionen durch die Dissoziation schon vorhanden sind, braucht der Strom die Moleküle nicht erst zu zerlegen. Die Ionen bewegen sich in der Lösung regellos zwischen den Molekülen des Lösungsmittels und den nicht dissoziierten Molekülen des Elektrolyten. Da die Ionen elektrisch geladen sind, hat der Strom in bezug auf die Leitung nur den Reibungswiderstand für den Transport der Ionen zu überwinden. Das ist das gleiche Resultat, wie es Kohlrausch schon gefunden hatte.

Durch Ostwald und Nernst (Ztschr. f. phys. Chem. 3, p. 120, 1889) wurde diese Theorie durchgeführt. Wenn in einer Lösung an zwei Querschnitten die Spannungen $+a$ und $-a$ vorhanden sind, so üben sie auf die an den Ionen haftenden Elektrizitäten Triebkräfte nach entgegengesetzten Richtungen aus und die Geschwindigkeiten der Ionen sind umgekehrt proportional den Reibungswiderständen. Die in der Zeiteinheit transportierte Elektrizitätsmenge ist also proportional: 1. der Spannungsdifferenz, 2. der Anzahl der freien Ionen, 3. der Summe der Wanderungsgeschwindigkeiten. Die Feststellung dieser Geschwindigkeiten ist also von größter Bedeutung. Darum hat Kohlrausch diese wie die mit 1 g-Mol. wandernde Elektrizitätsmenge und die auf jedes Gramm ausgeübte Kraft im CGS-System berechnet (Wied. Ann. 50, p. 385, 1893) und endlich in Verbindung mit Holborn und Diesselhorst eine Reduktion aller Beobachtungen auf dies System mit vollständiger Temperaturkorrektion gegeben (ib. 64, p. 417, 1898). Der Temperatureinfluß ist ein doppelter, steigende Temperatur erhöht die Beweglichkeit der Ionen, aber der Dissoziationsgrad, d. h. das Verhältnis der Anzahl dissoziierter Moleküle zu allen vorhandenen, wird bei solchen Ionen, die zu ihrer Vereinigung zu neutralen Molekülen Wärme verbrauchen, bei steigender Temperatur geringer. Ist diese Abnahme größer als die Zunahme der Beweglichkeit, so ist der Temperaturkoeffizient negativ, z. B. bei Phosphorsäure.

Eine besonders schwierige Frage war die nach der Leitfähigkeit des Wassers gewesen, die sich ja von Erman (s. oben) bis zum Ausgang des 19. Jahrhunderts erhalten hat. Kohlrausch hatte nachgewiesen, daß bei 18° das reinste Wasser ein Leitungsvermögen von 0,0000000361, dagegen gewöhnliches destilliertes Wasser $2 \cdot 10^{-6}$ besitzt (ib. 53, p. 209, 1894), so entsteht die Frage: Ist überhaupt reines Wasser möglich? Warburg glaubt, daß immer geringste Mengen gelöster Elektrolyten darin sind (ib. 54, p. 396, 1895) und da bei den Kohlrauschschen Versuchen sich ergeben hatte, daß Glas und nahezu alle festen Körper in Lösung gehen, so ist die Frage schwer zu beantworten. Bei Drude taucht zum ersten Male der Gedanke auf, daß das Wasser auch in sich selbst dissoziiere, d. h. daß im Wasser Hydroxylionen OH und H vorkommen (ib. 60, p. 500, 1897). Als gesichertes Ergebnis dieses Abschnittes ist die Feststellung der elektrolytischen Leitung gegenüber der metallischen Leitung (s. unten) zu buchen. Eine übersichtliche Darstellung dieser elektrolytischen Leitung auf der Grundlage der kinetischen Gastheorie hat Riecke (Ztschr. f. phys. Chem. 6, p. 564, 1890) gegeben, worin er feststellt, daß die mittlere Weglänge von der Größenordnung 10^{-8} ist, und die Überführungszahlen aus mittlerer Weglänge, Masse und mittlerer Geschwindigkeit der Ionen berechnet.

Die Stromerzeugung im Element und konstante Elemente.

Es ist oben erwähnt, daß Faraday keine Theorie lieferte. Aber die gleichzeitigen Untersuchungen Daniells führten zunächst zu der praktischen Lösung, konstante Elemente herzustellen. Während der Jahre 1806—1830 war der Fortschritt sehr gehemmt durch die Einführung der unipolaren Leitung von Erman (Gilb. Ann. 22, p. 14, 1806) und des Übergangswiderstandes durch Marianini (Saggio di esp. elet. 1825, p. 49 usw.). Die vollständige Literatur ist in meinen Akkumulatoren f. Elektr., 3. Aufl., p. 81—83, angegeben. Ohm (1787—1854) zeigte zunächst, daß die unipolare Leitung ein Resultat der Zersetzung, also eine Art Polarisation war; er nennt es eine „Gegenspannung“ und beweist dann auch, daß durch die Entstehung von Spannungsschichten bzw. durch Bildung dünner Oxydschichten der Übergangswiderstand erklärt werde (Schweigg. Journ. 59, p. 385; 60, p. 32, 1830; 63, p. 385; 64, p. 20, 133, 257, 1831/32).

Wunderbarerweise taucht der Gedanke eines besonderen Übergangswiderstandes wieder auf bei Gore (Proc. R. S. 37, p. 35, 1884;

40, p. 380, 1886 usw.), bei Colley (Pogg. Ann. 157, p. 392, 1876), bei Jahn (Wied. Ann. 31, p. 939, 1887). Schon die Untersuchungen von Lohnstein (Wied. Ann. 47, p. 299, 1892) geben an die Hand, daß der von ihm als Übergangswiderstand bezeichnete Abfall der Intensität nicht einem geheimnisvollen Übergangshindernis zuzuschreiben ist; denn die Bedeckung der Zinkplatte mit elektrolytisch niedergeschlagenem reinen Zn beseitigt die Anomalie und Kohlrausch hat außerdem eine große Reihe von Fehlerquellen nachgewiesen, die eine solche Anomalie bedingen können (ib. 49, p. 226, 1893).

Es handelt sich bei diesen Versuchen stets um die Prüfung der Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes (s. unten). Ohm hatte bei Ableitung seines Gesetzes schon den Wunsch ausgesprochen, ein konstantes Element zu besitzen. Auch er mußte zunächst mit hydroelektrischen Ketten arbeiten, bis er sie durch Thermosäulen ersetzte (Schweigg. Journ. 46, p. 141, 1826).

Kemp suchte die Inkonstanz des Zn-Cu-H_2O-Elements dadurch zu heben, daß er das Zn ersetzte durch flüssiges Zinkamalgam. Aber da die Polarisation dadurch nicht beseitigt wurde, blieb die Inkonstanz erhalten (Ann. of Electr. 1, p. 81, 1828). Sturgeon amalgamierte 1830 dann die Zinkplatte und erhielt dieselbe dadurch für längere Zeit, aber er erreichte nicht die Beseitigung der Polarisation (Pogg. Ann. 40, p. 628, 1837). Wach war auf dem rechten Wege, indem er den Zn-Stab in eine durch eine tierische Blase unten verschlossene Glasröhre mit Wasser steckte, während die Cu-Platte in Kupfervitriol tauchte. Aber ihn interessierte nur die Endosmose (Schweigg. Journ. 58, p. 20, 1830). An eine konstante Kette hat er überhaupt nicht gedacht.

Dagegen suchte Becquerel eine solche und teilte einen Glaskasten durch zwei ausgespannte Goldschlägerhäute in drei Abteilungen; die mittelste füllte er mit irgendeiner Säure oder Salzlösung, die eine der beiden Endzellen mit salpetersaurer Kupferoxydlösung mit der Kupferelektrode, die dritte mit schwefelsaurem Zinkoxyd und der Zn-Platte. Die elektromotorische Kraft war nach 30′ schon um 20% gesunken (Ann. de Chim. et de Phys. 41, p. 22, 1826). Daniell wollte unter Beibehaltung von Zn und Cu das Zinkoxyd entfernen und den H absorbieren. In einen Kupferzylinder ließ er, getragen von einem auf dem Rande des Zylinders ruhenden Holzkreuz, eine Ochsengurgel hängen, die unten im Boden des Zylinders durch einen Kork eingeklemmt wurde. Durch den unteren Kork ragte in den Raum der Ochsengurgel eine **U**-förmig

gebogene Glasröhre, die außen in $^9/_{10}$ der Höhe des Elements seitlich abgebogen war, damit die Schwefelsäurelösung, welche er in die Gurgel goß, bei zu hohem Stande abfließen konnte. Außer der H_2SO_4-Lösung hing er in die Gurgel einen Zn-Stab; um das sich bildende $ZnSO_4$ abzuführen, ließ er dauernd frische H_2SO_4-Lösung der Gurgel zuführen. In den Raum zwischen Cu-Zylinder und Gurgel brachte er konzentrierte $CuSO_4$-Lösung und in einem kleinen Siebe ungelöste $CuSO_4$-Stücke. Theoretisch bleibt dies Element dauernd konstant, wenn nur die Ochsengurgel aushielte. Daniell bewies, daß er 6 Stunden konstanten Strom entnehmen konnte (Phil. Trans. 1836, I, p. 117).

Wie einst Becquerel bei den endosmotischen Versuchen die tierische Membran Porrets durch einen Tonzylinder ersetzt hatte, so ersetzte Gassiot die Ochsengurgel durch einen Tonzylinder, wo nun, da das $ZnSO_4$ am Boden des Zylinders liegen blieb, um eine Berührung mit dem $CuSO_4$ zu verhindern, der untere Teil des Tonzylinders paraffiniert wurde. Von den zahlreichen „Verbesserungen“ des Daniellschen Elementes haben dauernden Erfolg nur die Formen gefunden, welche Siemens durch Beseitigung der porösen Tonzelle und Ersatz durch Pappmasse gab (Pogg. Ann. 108, p. 608, 1859) und Meidinger durch Beseitigung des porösen Diaphragmas bei vertikaler Anordnung und Anwendung von Bittersalzlösung (ib., p. 602).

Wegen der großen Konstanz dieses Elementes ist in den meisten älteren Arbeiten bis zur Einführung des Volt die elektromotorische Kraft nach Daniell gemessen.

Sehr viel stärkere elektromotorische Kraft liefert das Grovesche Element, bei welchem amalgamiertes Zn in verdünnter Schwefelsäure und Platin in Salpetersäure die Elektroden sind (Phil. Mag. 15, p. 287, 1839). Statt der dabei von Grove angewandten parallelopipedischen Glaströge mit Platten gab Poggendorff dem Element zylindrische Form (Pogg. Ann. 54, p. 420, 1841). Schon Cooper ersetzte das teure Platin durch Platten aus Kohle und Graphit und Schönbein führte Retortenkohle ein (ib. 49, p. 589, 1840). Bunsen setzte für diesen Zweck seine aus Steinkohlen und Koksstaub hergestellten Kohlenplatten an die Stelle des Platins und bekam fast die gleiche elektromotorische Kraft wie Grove, etwa 1,8 Daniell (ib. 54, p. 417, 1841). Andere Abänderungsversuche, z. B. Oerstedts (ib. 53, p. 381, 1841), haben sich nicht bewährt.

In der gleichen Arbeit, wo Bunsen seine Kohle einführt, sind auch seine Versuche mit Chromsäure und doppeltchromsaurem

Kali enthalten, welche zur Konstruktion der Tauchbatterie führten, wo nur die eine Flüssigkeit verwendet wird. Die Konstanz dieses Elements ist nur für kurze Zeit vorhanden, stellt sich aber wieder her, wenn die Säure kurze Zeit Ruhe gehabt hat.

Bald nach Grove konstruierte Hawkins (Phil. Mag. 16, p. 115, 1840) eine Kette, wo er das Platin durch Eisen ersetzte. Er benutzt da die Passivität des Eisens. Diese ist zuerst von Keir entdeckt (Phil. Trans. 1790, p. 359), dann ganz in Vergessenheit geraten, von Wetzlar wiederentdeckt (Schweigg. Journ. 49, p. 486, 1827) und von Schönbein mit dem Namen Passivität versehen (Pogg. Ann. 37, p. 390 u. 590, 1837). Nach vielem Hin und Her über die Ursache der Passivität hat v. Beetz nachgewiesen, daß sich auf dem Eisen eine in Salpetersäure unlösliche Oxydschicht bildet, die gegen das Eisen stark negativ ist (ib. 62, p. 234, 1844; 63, p. 415, 1844; 67, p. 186 u. 365, 1846). Das Hawkinssche Element ist so lange konstant, als die Oxydschicht dicht bleibt.

Sehr konstant ist auch das Element von Pincus in Miniaturform. In einem Reagenzglas taucht, an einen isolierten Draht gelötet, ein kleiner silberner Becher mit Chlorsilberpulver, in die Füllung mit verdünnter Schwefelsäure (oder Salzlösung) ragt von oben ein kleiner amalgamierter Zinkstab; die elektromotorische Kraft ist nahezu gleich 1 Daniell. Konstant ist das Element, solange noch Chlorsilber unzersetzt ist (Pogg. Ann. 135, p. 167, 1868). Auch das Lechlanché-Element ist lange Zeit konstant bei größter Einfachheit. Neben dem Zn ist die andere Elektrode ein aus Braunstein und Retortenkohlepulver, entweder in einen Tonzylinder aufgeschüttet, oder zu einem festen Körper gepreßt, bestehendes Gemisch in Salmiaklösung (Dinglers Journ. 186, p. 270, 1867, und 188, p. 96, 1868, und C. R. 83, p. 54, 1876). Die Bedeutung des Braunsteins für die Konstanz des Elements ist von Beetz ausführlich untersucht und auch der Ersatz des Braunsteins durch Bleisuperoxyd (Münch. Ber. 1873, p. 89).

Die konstanten Elemente haben wesentlich an Bedeutung als Stromquelle verloren, seit durch die Dynamomaschine eine billigere und leistungsfähigere Stromquelle zur Verfügung steht, aber für die Messung der elektromotorischen Kraft sind diese Elemente dauernd wichtig geblieben und noch heute in der Praxis unentbehrlich.

Schon Ritter (s. oben) hatte die Stromstärke nach der Menge des erzeugten Gases, sowohl des Knallgases wie des Wasserstoffs, gemessen. Faraday richtete danach sein „Voltaelektrometer“ ein, indem er in ein Glasgefäß, durch einen mit drei Öffnungen ver-

sehenen Deckel verschlossen, verdünnte Schwefelsäure vom spezifischen Gewicht 1,34 luftdicht füllte, durch die beiden seitlichen Öffnungen zwei Platinbleche in die Flüssigkeit einführte, durch die mittlere eine Glasröhre, die das Gas in eine kalibrierte weitere Röhre führte. Dann gab er die Stromstärke nach Kubikzollen des entwickelten Knallgases an (Exp. res. 7, § 710, 1833). Da Davy (s. oben) schon die Okklusion des O durch das Wasser festgestellt hatte, änderte De la Rive den Apparat so ab, daß er das mittlere offene Rohr bis auf den Boden des Gefäßes führte. Er setzte voraus, daß das okkludierte Gas sein Volumen beibehielt, also der Gasdruck im Gefäß unabhängig von der Okklusion sei. Dann konnte er an der Steighöhe der Flüssigkeit in der Röhre die Menge des entwickelten Knallgases messen. Den Apparat nannte er Voltameter (Pogg. Ann. 40, p. 378, 1837). Ganz analog war das Voltameter von Stratinghs (Bull. Néerl. 1839, p. 445). Roberts benutzte dazu ein U-förmig gebogenes Rohr, dessen einer Schenkel in einem weiten, offenen Gefäß endete, dessen anderer Schenkel in eine durch eingeschliffenen Hahn verschließbare Spitze auslief. In dies letztere Rohr brachte er unten die beiden Platinplatten. Das Rohr war kalibriert, so daß er die Menge des entwickelten Knallgases messen konnte (Ann. of Electr. 4, p. 401). Aus dieser Form entwickelte er die heute noch viel gebrauchte Form der drei Röhren, indem er das Rohr mit dem weiten Gefäß an die Mitte des U-förmigen Rohres ansetzte und beide Seitenrohre in Spitzen endigen ließ, in jedes Seitenrohr eine Platinplatte einschmolz, um die Gase getrennt auffangen zu können. A. Hofmann gab ihm die jetzt gebräuchliche Form.

Jacobi setzte dann fest, daß der Strom 1 derjenige sein sollte, welcher in der Zeit 1 ein Kubikzentimeter Knallgas entwickele (Pogg. Ann. 70, p. 105, 1847). Dagegen wollte Becquerel die Stromstärke messen durch die Zersetzung von Metallösungen; er wog den kathodischen Kupferdraht in einer Kupfervitriollösung vor und nach der Zersetzung, oder den kathodischen Silberdraht in salpetersaurer Silberlösung und wollte die Einheit der Stromstärke definieren als diejenige, welche in der Zeit 1 ein mg Cu bzw. 1 mg Ag entwickelte und führte die Reduktion des Jacobischen Strommaßes 1 auf Cu und Ag durch, so daß 1 ccm Knallgas = 1,889 mg Cu = 6,432 mg Ag sei (Pogg. Ann. 42, p. 307, 1837). Poggendorff gab dem Silbervoltameter dann eine Form, die lange Zeit angewandt wurde, zumal er nachgewiesen hatte, daß die vermutete Hydratation nicht stattfinde (Pogg. Ann. 75, p. 341, 1848). Das Silbervoltameter ist seit Fr. Kohlrauschs Arbeiten dauernd

in der von ihm angewandten Form benutzt (Wied. Ann. 27, p. 1, 1886). Für die elektromotorische Kraft benutzte man, wie schon erwähnt, als Normalmaß die des Daniellschen Elementes. Um da alle störenden Einflüsse auszuschließen, besonders um die schnelle Vermischung der Flüssigkeiten zu hindern, hatte Raoult zwei nur durch ein Rohr mit porösen Diaphragmen verbundene Gefäße vorgeschlagen (Ann. de Chim. et de Phys. 2, p. 345, 1864) und Kittler hat ganz speziell Vorschriften für ein Normaldaniell gegeben (Wied. Ann. 17, p. 890, 1882) wobei er die amalgamierte Zn-Platte in Zinkvitriollösung steckt.

Jedoch die schon von Ritter beobachtete starke Abhängigkeit von der Temperatur zeigt sich beim Daniellschen Element recht störend, wie Lindig nachwies (Pogg. Ann. 125, p. 1, 1864). Darum ist dasselbe mehr und mehr verdrängt durch Elemente mit geringen Temperaturkoeffizienten; als solche haben sich bewährt: das Clarkelement: Am Boden des Gefäßes Quecksilber, darauf breiiges, schwefelsaures Quecksilberoxydul, in konzentrierter Zinkvitriollösung gekocht. In das Quecksilber führt ein Platindraht, in die Paste von oben ein amalgamierter Zinkstab (Journ. of Telegr. Engin. 7, p. 53, 1878). Rayleigh ändert die Form, indem er zwei Probierröhrchen durch ein in halber Höhe angebrachtes Verbindungsrohr zu einem Apparat vereinigt, nun von unten in beide Röhrchen Platindraht einführt und auf die eine Seite einfach Zinkamalgam einfüllt, beide Seiten mit oben erwähnter Paste und konzentrierter Zinkvitriollösung bedeckt (Phil. Trans. 175, p. 411, 1884). In beiden Formen werden die Gefäße durch Paraffinschicht abgeschlossen. Nach Untersuchungen von Kahle ist das Element sehr konstant mit geringem Temperaturkoeffizienten (Ztschr. f. Instrumentenk. 12, p. 117, 1892). Noch dauernder sind die von Czapski erfundenen Elemente, in denen das Zinkamalgam durch Cadmiumamalgam und die $ZnSO_4$-Lösung durch $CdSO_4$ ersetzt ist (Wied. Ann. 21, p. 235, 1884). Wir in Deutschland nennen die Elemente nach dem Nacherfinder Weston (1893)! Der Temperaturkoeffizient ist von Jaeger und Wachsmuth außerordentlich klein gefunden (ib. 59, p. 574, 1896) und bis heute sind diese Elemente von keinem anderen übertroffen an langandauernder Konstanz.

Die Theorie der Stromerzeugung.

Die älteren Theorien von Volta, als Kontakttheorie begründet, und die chemische Theorie Ritters und Davys sind oben charakterisiert. Zu einem vollständigen Siege konnte letztere nicht kommen,

solange der Voltasche Fundamentalversuch nicht erklärt war. Diese Schwierigkeit erklärt es, daß z. B. ein Mann wie Berzelius, der erst ein eifriger Anhänger der chemischen Theorie war, schließlich zur Kontakttheorie überging (Lehrbuch 1, p. 83, 1843). Und Pfaff hat bis an sein Lebensende die Kontaktkraft als alleinige Ursache des Stromes angesehen (Parallele der chemischen und Kontakttheorie, 1845). Faraday hat keine eigene Theorie aufgestellt; er war zunächst Anhänger der Davyschen Theorie (Exp. res., § 880) und wandte sich gegen die Kontaktkraft, da sie aus nichts eine Kraft erzeugen wolle. Später ließ er sie doch wieder zu (El. II, p. 18, 1840). Die meisten Theorien nehmen die Affinitätskräfte als gegeben an und setzten auch die Fechnersche Theorie der chemischen Verbindungen (Pogg. Ann. 44, p. 39, 1838) voraus, so Gmelin (ib., p. 1, 1838). Das Wassermolekül enthält den Sauerstoff mit —-Ladung und H mit +; taucht Zn ein, so ist die Affinität zu O größer als die von Cu zu O. Die Differenz dieser Affinitäten bedingt den Strom und die Zersetzung. Zum Strome aber kommt es nur, wenn nach Matteucci (1811—1868) nun wirklich ein Ion abscheidet (Ann. de Chim. et de Phys. 10, p. 78, 1844; 16, p. 257, 1846; C. R. 39, p. 258, 1854).

Helmholtz half sich über die Schwierigkeit hinweg mit der Annahme, daß die verschiedenen chemischen Stoffe verschiedene Anziehungskräfte gegen die beiden Elektrizitäten haben, daß die Anziehungskräfte der Stoffe nur in molekularer Entfernung wirken, während die Elektrizitäten auch auf größere Distanzen wirken. Die Kontaktkraft ist dann die Differenz der Anziehungskräfte, welche die sich berührenden Metallteile auf die dort vorhandene Elektrizität ausüben und das elektrische Gleichgewicht muß eintreten, wenn ein elektrisches Teilchen, welches von dem einen Metall zum anderen übergeht, nichts mehr an lebendiger Kraft verliert oder gewinnt (Über d. Erhalt. d. Kraft 1847, p. 46).

Eine Vereinigung der Kontaktkraft mit der chemischen Theorie erstrebt Schönbein. Er behandelt Zn—H_2O—Cu; Zn ist „sauerstoffgierig“, wird Zn in H_2O gesteckt, so wenden sich sämtliche H_2O-Moleküle, die mit der Zn-Platte in Berührung kommen, so, daß sie dem Zn den O zuwenden; nun tritt zwischen Zn und O die Kontaktkraft auf, deren Resultat die Polarisierung des Wassermoleküls ist. Das erste Wassermolekül wirkt auf das benachbarte, so entsteht ein Spannungszustand in der Flüssigkeit. Taucht nun die zweite Metallplatte ein, so kann diese „wasserstoffgierig“ sein oder auch sauerstoffgierig, aber in geringerem Grade als das Zn.

In beiden Fällen wird der Spannungszustand in der Flüssigkeit erhalten und der + H wirkt polarisierend auf die Cu-Platte. Es besteht also jetzt der Spannungszustand so, daß das herausragende Ende der Zn-Platte —, das der Cu-Platte + geladen ist. Wird nun das offene Element durch einen Leitungsdraht geschlossen, so fließt die +-Elektrizität vom Cu zum Zn, oder „es setzt sich der Polarisationszustand durch die Moleküle des Leitungsdrahtes fort" und die Ladungen werden ausgeglichen, sobald im Elektrolyten sich die —-Elektrizität des O mit der + des Zn verbindet, dadurch, daß ZnO gebildet wird; dann breitet sich die Zersetzung der in einer Reihe liegenden polarisierten Wasserteilchen bis zur Cu-Elektrode aus; dort gibt der freiwerdende H seine Ladung an die mit —-Elektrizität geladene Cu-Platte ab und entweicht selbst ungeladen in die Luft (Pogg. Ann. 39, p. 351, 1836; 43, p. 229; 44, p. 59, 1838; 57, p. 39, 1842; 78, p. 289, 1849). Die von G. Wiedemann dargestellte und meist nach ihm benannte Stromtheorie weicht von der Schönbeins nur in sehr untergeordneten Punkten ab (Lehre von d. Elektr. I, p. 251, 1882).

Helmholtz hat die von Schönbein beschriebene Bildung an der Zn-Platte mit dem Namen einer Doppelschicht bezeichnet, so daß die Zn-Platte mit +-, die Sauerstoffteilchen mit —-Elektrizität in ihrer Oberflächenberührung eine solche Doppelschicht bilden und diese Doppelschichten, die er als Kondensatorladungen behandelt (Pogg. Ann. 150, p. 483, 1873, und Wied. Ann. 7, p. 337, 1879), benutzt er dann, um die Strombildung zu erklären (ib. 11, p. 747, 1880). Ein Strom kann dann erst entstehen, wenn das Ion die Hälfte seiner Ladung abgibt und dafür die entgegengesetzte eintauscht und so neutral entweicht, oder auch mit dem äquivalenten Atom der Elektrode eine neutrale Verbindung eingeht.

Auch die Theorie von Sohncke (Ztschr. f. phys. Chem. 3, p. 1, 1889) unterscheidet sich sehr wenig von der alten Schönbeinschen. Er nimmt als Elektrolyten verdünnte Schwefelsäure, läßt aber nicht nur die H_2SO_4-Moleküle, sondern auch die H_2O-Moleküle zerfallen.

Diesen Theorien, die mehr oder weniger die Kontaktkraft heranzogen, stellt Nernst eine Theorie der Stromerzeugung entgegen, welche die Dissoziation im Elektrolyten zur Voraussetzung hat. Nernst knüpft an eine Betrachtung der Konzentrationsketten an (Ztschr. f. phys. Chem. 2, p. 613, 1888; 4, p. 129, 1889). Diese sind zuerst genauer von Helmholtz untersucht (Wied. Ann. 3, p. 201, 1878), indem er die elektromotorische Kraft für den Fall

berechnet, daß über der konzentrierteren Lösung die verdünnte lagert, aus der Wanderungsgeschwindigkeit, die dann von dem Konzentrationsverhältnis der Lösungen abhängt. Angewendet hat Helmholtz diese Rechnung auf seine Kalomelkette (Ber. Berlin 1882, p. 825); auch Moser prüfte dieselbe (Ber. Wien 94, p. 115, 1886). Nernst geht aus von den Hittorfschen Beobachtungen der Wanderungsgeschwindigkeiten der Ionen. Seien dieselben für das Kation u, für das Anion v, sei der osmotische Druck für die konzentriertere Lösung p_1, für die dünnere p_2. Ist in dem Volumen V ein Grammolekül vorhanden, so wird, wenn der Druck von p_1 auf p_2 sinkt, die Arbeit

$$\int_{p_1}^{p_2} V \cdot d\, p$$

frei. Da zur Abscheidung eines Gramms H 96540 Coulomb notwendig sind, so wird dieser Transport von $\frac{u}{u+v}$ Kationen und $\frac{v}{u+v}$ Anionen geleistet, und da $p \cdot V = R \cdot T$ ist, so ist die Arbeit der Kationen

$$A_k = \frac{u}{u+v} \int_{p_1}^{p_2} V\, d\, p = \frac{u}{u+v}\, R\, T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}\,.$$

Ebenso der für die Anionen

$$A_a = \frac{v}{u+v} \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}\,.$$

Die disponible Energie ist also

$$= \frac{u-v}{u+v} \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = E.$$

Dies Resultat ist von Nernst auch experimentell geprüft. Eine ausführliche Behandlung des ganzen Problems gab Planck (Wied. Ann. 39, p. 161, 1890; 40, p. 561, 1891).

Nernst fand dabei das Prinzip der Superposition; d. h. stellt man zwei Ketten her, worin die Salzlösungen von gleichem Verhältnis der Äquivalentgehalte sind, wo in der einen Kette die Konzentration n mal so groß ist wie in der anderen, so sind die Spannungsunterschiede in beiden Ketten die gleichen.

Um nun auch die Elektroden zu berücksichtigen, nimmt Nernst an, in Übereinstimmung mit Ergebnissen von F. Kohlrausch und Warburg (s. oben), daß die Metalle auch Metallionen in die Lösung geben, d. h. eine Lösungstension besitzen; dieselbe sei P.

Ist der osmotische Druck p, so kann 1. $P > p$, 2. $P = p$, 3. $P < p$ sein. Im ersten Falle gehen +-Metallionen in Lösung; dadurch wird an der Elektrode —-Elektrizität frei, es entsteht eine Doppelschicht und diese verhindert einen weiteren Abgang von Metallionen. Durch einen Schließungsbogen wird entladen und das Spiel beginnt von neuem. Fall 2: Es entsteht kein Strom. Fall 3: Metallionen gehen aus der Lösung zu den Elektroden. Unter Vernachlässigung der etwaigen Kontaktkraft, die, wenn vorhanden, nach Le Roux (Ztschr. f. phys. Chem. 10, p. 387, 1892) sehr klein ist, ergibt sich

$$E = \frac{0{,}0002}{n} T \cdot \left(\log \frac{P_1}{P_2} - \log \frac{p_1}{p_2}\right) \text{ Volt.}$$

Diese Theorie ist in zahlreichen Untersuchungen bestätigt, die in Ostwalds Allgemeiner Chemie zum größten Teil dargestellt sind. Ostwald untersucht dabei besonders die Reduktion an der Kathode und die Oxydation an der Anode in den Oxydations- und Reduktionsketten. Die Gesetze dieser sind von Bancroft ausführlich dargestellt (Ztschr. f. phys. Chem. 14, p. 193, 1894).

Die ehemals im Vordergrund des Interesses stehenden Kontaktspannungen der Metalle sind nun durch die Spannung zwischen Elektrode und Elektrolyt ersetzt. Hier hängt der Spannungsunterschied von der Lösungstension und dem osmotischen Druck ab, deren Differenz die Wirksamkeit der Kette wesentlich bedingt. Ostwald hat zur Messung dieser Differenz eine Methode angegeben (Phil. Mag. 22, p. 70, 1886), die aus Helmholtz' Theorie (s. oben) hervorgegangen ist und die Untersuchungen Lippmanns über Oberflächenspannung und elektrische Spannungsdifferenz (C. R. 95, p. 686, 1882) benutzt. Dieselbe ist von Paschen noch erweitert (Wied. Ann. 41, p. 42, 1890) und führt zu einer Spannungsreihe nach der Lösungstension (Lüpke, Grundzüge, p. 116, 1895).

Die Elemente sind nun wesentlich verschieden, je nachdem sie reversibel oder nicht umkehrbar sind. Leistet ein reversibles Element die äußere Arbeit π und ist dabei die Wärmetönung im Element q, so forderte W. Thomson (Phil. Mag. 1851, p. 429), daß $\pi = q$ sei, d. h. daß die Wärmetönung des chemischen Prozesses gleich seiner elektromotorischen Kraft sei. Daß dies nicht zutrifft, hat Helmholtz abgeleitet (Ber. Berlin, p. 825, 1882); es ist experimentell erwiesen an mehreren Ketten von Braun (Wied. Ann. 5, p. 182, 1878; 16, p. 561, 1882) und besonders durch Czapski (Wied. Ann. 21, p. 209, 1884) und Jahn (ib. 26, p. 21 u. 491, 1886). Es wird nach Ostwald an den Elektroden Arbeit verbraucht zur

Überwindung des dort bestehenden Spannungsunterschiedes und zur Ladung von Ionen; für diese letztere führt er den Namen Ionisierungswärme ein (Allg. Chem. II_1, p. 948 ff., 1895).

Polarisationszellen.

Die Ladungssäule Ritters mit der richtigen Erklärung durch Volta ist oben erwähnt, auch bemerkt, daß die Weiterbildung dieser Anfänge durch die Ermansche Theorie der unipolaren Leitung und die Lehre vom Übergangswiderstand aufgehalten ist. Der erste, welcher nun wieder die Polarisation im Element richtig erfaßte, war Ohm, welcher die Stromschwächung im Element auf die Bildung einer „Gegenspannung" zurückführte und mit den Anhängern eines Übergangswiderstandes heftig zu kämpfen hatte (Schweigg. Journ. 63, p. 385; 64, p. 20, 133, 257, 1832). Bei Ohms Versuchen handelte es sich um Gaspolarisation an den Elektroden; um diese bequem am Multiplikator nachweisen zu können, hatte Pohl (1788—1849) die noch heute viel gebrauchte einfache Wippe mit sechs Quecksilbernäpfchen, von denen zwei gegenüberliegende mit der Polarisationszelle verbunden waren, konstruiert; die beiden Seitenpaare standen auf der einen Seite mit der Stromquelle, auf der anderen mit dem Galvanometer in Verbindung und die Wippe stellte alternierend die Verbindung mit der Polarisationszelle her (Kastners Arch. 13, p. 46, 1828). Golding Bird stellte an Platinelektroden in verdünnter Schwefelsäure fest, daß die Gaspolarisation in die Platinplatte so tief eindringe, daß nach Herausnehmen und Abwaschen mit verschiedenen Flüssigkeiten doch noch Polarisation nachweisbar sei (Phil. Mag. 13, p. 381, 1838). Das hatte Ritter (s. oben) freilich schon 1805 für Silberplatten in der Polarisationszelle nachgewiesen.

Schönbein faßt 1839 das Resultat seiner Versuche in die Worte: Alle sekundären Ströme, welche durch sogenannte polarisierte Körper erregt werden, haben ihre Quelle in einer gewöhnlichen chemischen Aktion, die entweder in einer Vereinigung von Stoffen oder in einer Zersetzung einer chemischen Verbindung besteht. Der sicherste Nachweis einer vorhandenen Elektrolysation ist der polarisierte Zustand der Elektroden (Pogg. Ann. 47, p. 101, 1839).

Die Untersuchungen von Lenz über Gaspolarisation ergaben, daß die gesamte Polarisation = der Summe der an den Elektroden erzeugten Polarisation ist, und daß sich Polarisation und elektromotorische Kraft in jeder Zersetzungszelle algebraisch summieren

(ib. 67, p. 497, 1846). Um das Maximum der Polarisation, d. h. die elektromotorische Gegenkraft während des primären Stromschlusses messen zu können, hat Fuchs eine Methode der Nebenschaltung einer Elektrode mit einer Platte, auf welcher die Leitung keine polarisierende Wirkung ausübt, ausgebildet, wobei also die Polarisation an jeder Elektrode einzeln untersucht wird (Pogg. Ann. 156, p. 158, 1875). Eine andere Methode mit Nebenschluß eines Galvanometers und Elektrometers hat Föppl bekannt gemacht (Wied. Ann. 27, p. 189, 1886).

Poggendorff hatte gemeint, bei Widerstandsmessungen in einem Elektrolyten sich von der „störenden" Gaspolarisation zu befreien durch Benutzung eines Wechselstromes einer Saxtonschen Maschine (Pogg. Ann. 50, p. 261, 1840; 62, p. 497, 1844). Jedoch hat F. Kohlrausch gezeigt, daß auch bei diesen alternierenden Strömen Polarisation eintritt und eine Meßmethode mit Dynamometer oder Telephon ausgearbeitet (Pogg. Ann., Jubelb. 1874, p. 290; 154, p. 1 u. 215, 1875; Wied. Ann. 6, p. 1 u. 145, 1879), nachdem schon Raoult gezeigt hatte, daß, wenn man bei der Schönbeinschen Methode den Wechsel zwischen Einschaltung zur Ladung und Einschaltung zum Elektrometer schnell mit etwa 100 Wechseln pro Sekunde eintreten läßt, ein stationärer Zustand eintritt, der das Maß der Polarisation darstellen kann (Ann. de Chim. et de Phys. 2, p. 326, 1864). Um so die Polarisation messen zu können, hat Le Blanc den Stimmgabelunterbrecher konstruiert (Ztschr. f. phys. Chem. 5, p. 470, 1890), während Richarz sich des Helmholtzschen Pendelunterbrechers bedient, um durch drei aufeinanderfolgende Kontakte den Primärstrom vom Polarisationsstrom zu trennen (Wied. Ann. 39, p. 67 u. 201, 1890).

Crova glaubte nachgewiesen zu haben, daß die Polarisation nur vom Elektrolyten abhänge und nicht von den Elektroden (Ann. de Chim. et de Phys. 68, p. 413, 1863). v. Helmholtz zeigte, daß das nicht allgemein der Fall sei, sondern daß das Minimum der Polarisation wesentlich bedingt ist durch die Fähigkeit der Elektroden, den H zu okkludieren (Wied. Ann. 34, p. 737, 1888). Crova hatte damit nichts mehr gesagt, als was Buff schon 20 Jahre früher so ausgedrückt hatte: „Durch die Wasserstoffschicht an der —-Platte und die Sauerstoffschicht an der +-Platte wird dasselbe erreicht, wie wenn nicht zwei Platinstreifen, sondern ein Streifen festen Wasserstoffs und ein Streifen festen Sauerstoffs in die Säure eingeführt wäre" (Liebigs Ann. 41, p. 136, 1842). Demgegenüber hatte schon Beetz nachgewiesen, daß die Buffsche Behauptung nur zu recht

bestehe, wenn wir als Kathode eine Elektrode haben, deren Okklusionsfähigkeit Null ist, und eine Anode, die nicht oxydationsfähig ist. Diese Bedingungen sind aber nie erfüllt (Pogg. Ann. 77, p. 511, 1849).

Daß Erschütterungen und Temperaturerhöhung die Polarisation vermindern, ist von Schönbein (l. c.) und Buff (l. c.) beobachtet und von Helmholtz (Wied. Ann. 11, p. 737, 1880) bestätigt. Ausgedehnte Versuchsreihen, die sich auch auf Palladium beziehen, sind von Parnell (Phil. Mag. 39, p. 52, 1870) ausgeführt. Daß Palladium außerordentliche Mengen H aufzunehmen vermag, bis zum 936fachen seines Volumens, ist von Graham (C. R. 68, p. 101, 1869) nachgewiesen; dabei dehnt sich das Palladium um 4,91% seines Volumens aus und Troost und Hautefeuille haben dabei ein Palladiumhydrür, Pd_2H, nachgewiesen (ib. 78, p. 686, 1874). Sowohl beim Platin wie beim Palladium geht der H durch die Platte ganz hindurch, wie Crova und Root zeigten (Pogg. Ann. 159, p. 416, 1876). Daß man aus solchen mit H und O durchsetzten Platinplatten auch Gaselemente herstellen kann, hat Grove bewiesen (Phil. Mag. 14, p. 129, 1839; 21, p. 417, 1842).

Für die technische Weiterentwicklung sind von größter Bedeutung die Beobachtungen von Sinsteden an Bleiplatten. Er bestätigte zunächst die Beobachtungen von Ritter (Voigts Mag. 6, p. 182, 1803) und Brugnatelli (Journ. de Phys. 62, p. 298, 1800). Ersterer hatte von hydrogenisierten Metallen gesprochen, letzterer meinte Hydrate nachweisen zu können. Seine eigenen Versuche mußten ihm zeigen, daß es keine Hydrate waren, die er in dem „schwammigen“ braunen Silber, Gold, Blei usw. vermutete. Sinsteden zeigte, daß das schwammige Blei reines Blei sei, welches H okkludiert habe. Aber Blei unterschied sich von den anderen Metallen wesentlich. Während bei Platin, Silber usw. bei häufiger Wiederholung des Ladungs- und Entladungsvorganges die Fähigkeit zur Okklusion sinkt, nimmt sie bei Blei zu bis zu einem Maximum, welches erst nach vielfachen Ladungen erreicht wird (Pogg. Ann. 92, p. 1, 1854). Die weiteren Versuche folgen unten.

Mit Hilfe der Dissoziationstheorie war ein allgemeines Schema für die Gaspolarisation leicht aufstellbar, aber es zeigten sich mancherlei „Störungen“, daß unter Umständen ganz etwas anderes beobachtet als berechnet wurde. Es zeigte sich, daß wohl ein schwacher primärer Strom imstande war, Polarisation an den Elektroden zu erzeugen, jedoch sichtbare Abscheidung der Gase erst bei einer bestimmten elektromotorischen Kraft eintrat, für verdünnte Schwefelsäure etwa

bei 1,6 V. Das zu erklären, nahm Le Blanc an, daß die Ionen eine bestimmte Haftintensität für ihre elektrische Ladung hätten (Ztschr. f. phys. Chem. 8, p. 299, 1891, und 12, p. 333, 1893). Die elektromotorische Kraft, bei welcher nun die Zersetzung, d. h. merkbarer Stromschluß eintritt, nennt er Zersetzungswert. Er ist denn auch der erste, welcher meint, daß in wäßrigen Lösungen nicht nur die Zerfallsprodukte des Elektrolyten, z. B. bei H_2SO_4 die H und SO_4, als Ionen vorhanden sind, sondern auch O-Ionen, die nicht aus einer sekundären Zersetzung des SO_4 und H_2O stammen, sondern wieder aus dem Zerfall von H_2O-Molekülen (Elektrochem., 1896). Thermodynamische Berechnung der Polarisation durch Jahn und Schönrock (Ztschr. f. phys. Chem. 16, p. 45, 1895) und die Berechnung der Wärmetönungen an den Elektroden durch Jahn (ib. 18, p. 399, 1895) haben Le Blancs Theorie bestätigt.

Um die Polarisationskapazität zu messen, hat W. Wien eine exakte Methode ausgearbeitet (Wied. Ann. 58, p. 27, 1896); eine andere stammt von Nernst (Ztschr. f. Elektrochem. 3, p. 163, 1896); beide benutzen das Telephon mit Nullmethode.

Daß auch Veränderungen bzw. Neubildungen an den Elektroden auftreten, hat Ritter auch zuerst beobachtet (Gehlens Journ. 5, p. 445, 1805); es zeigte sich, daß H auch mit der Kathode aus Tellur oder Antimon eine Verbindung eingeht und Tellurwasserstoff und Antimonwasserstoff bildet. Das zeigte auch Ruhland (Schweigg. Journ. 15, p. 417, 1815). Besonders wertvoll war die Untersuchung von Kastner an Bleielektroden in verdünnter Schwefelsäure. Die Anode überzieht sich mit braunem, glänzendem, nie schuppigem Überzug von Bleisuperoxyd, während an der Kathode H aufgenommen wird unter erheblicher Volumenvergrößerung (Kastner Arch. 6, p. 440, 1825).

Eine zunächst verblüffende Beobachtung von Pfaff (Gehlen Journ. 5, p. 95, 1808), daß Pb und Sn beim Eintauchen in konzentrierte Salpetersäure in den ersten Augenblicken eine andere Polarität zeigen als kurze Zeit nachher; daß aber die Stromrichtung in verdünnter Säure der des ersten Eintauchens in konzentrierter entsprach, konnte weder von ihm noch von Avogadro, welcher diese Erscheinung sehr ausführlich bei verschiedenen Elektrodenpaaren und Säuren wiederholte (Ann. de Chim. et de Phys. 22, p. 361, 1823) und wonach die Erscheinung den Namen „Avogadrosche Umkehrung“ erhielt, obwohl Pfaff sie gefunden hat, erklärt werden. Die Erklärung lieferte erst Fechner (Schweigg. Journ. 53, p. 61 u. 129, 1828, und ausführlich im Lehrbuch d. Phys. III,

p. 93ff.), indem an einer oder beiden Elektroden durch die konzentrierte Säure solche haftende Verbindungen bzw. Polarisationen hergestellt werden, daß sie eine veränderte Stellung in der Spannungsreihe bedingen und daher eine umgekehrte Stromrichtung erzeugen, während in der verdünnten Lösung die langsamen Veränderungen Zeit haben, entweder durch sekundäre Wirkung oder durch Abfallen von der Elektrode die ursprüngliche Stromrichtung zu erhalten.

Das von Kastner entdeckte Verhalten des Bleisuperoxyds erregte mehrfaches Interesse. Nobili gelangen seine durch Elektrolyse auf Platinplatten hergestellten Ringe mit den Newtonschen Farben am besten mit Bleisuperoxyd (Bib. univ. 33, p. 302, 1826, und folgende bis 37, p. 172). Schönbein (1799—1868) bestimmte die Stellung des PbO_2 in der Spannungsreihe (Phil. Mag. 12, p. 225, 1838). Wheatstone stellte auf Platinplatten durch Elektrolyse von Bleiazetatlösung einen feinen Überzug von PbO_2 her und stellt mit solchen Platten und Zinkamalgamplatten Elemente her, die außerordentlich große elektromotorische Kraft lieferten; am stärksten ist die Kraft bei PbO_2 und Kaliumamalgam in verdünnter Schwefelsäure (Phil. Trans. 1843, I, p. 303). Aber gegenüber den Versuchen, Wheatstone zum Vorarbeiter für die Erfindung der Akkumulatoren zu machen, muß betont werden, daß in der ganzen Arbeit kein Wort vorkommt, woraus man schließen könnte, daß Wheatstone auch nur daran gedacht hätte, ein Element herstellen zu wollen, welches erst geladen und dann entladen würde. Er wurde zu diesen Versuchen nur geleitet durch die Schönbeinsche Feststellung des Spannungscharakters und durch die Messungen Gmelins, der die Superoxyde untersuchte und speziell das Bleisuperoxyd als außerordentlich elektronegativ nachwies (Pogg. Ann. 44, p. 1, 1838).

Bei einer Untersuchung über die chemische Wirkung von gleichgerichteten Strömen magnetelektrischer Maschinen benutzte Sinsteden verschiedene Voltameter, darunter auch eins mit Bleiplatten. Er untersuchte die Stärke der erzeugten Polarisation und fand bei Bleiplatten von 7 × 4 Zoll, daß diese in verdünnter Schwefelsäure nach der Ladung, bei welcher die Anode den charakteristischen Überzug von PbO_2 erhielt und die Kathode eine schwarzgraue Farbe ohne sonstige Veränderung zeigte, imstande waren, einen recht lange konstant bleibenden Strom zu liefern (Pogg. Ann. 92, p. 1, 1854). Er hat dabei auch schon eine Reihe von Störungen untersucht, die erst viel später wieder entdeckt wurden; er hat aber diese Erfindung nicht technisch ausgebaut und ist nie wieder darauf zurückgekommen.

Aber dieser erste Bleiakkumulator fand doch Beachtung. Jacobi empfahl solche sekundären Ströme für die Telegraphie und diese Empfehlung veranlaßte Planté, seinen Akkumulator einzurichten, der sich nur dadurch unterschied von dem Sinstedenschen, daß er, um Raum zu ersparen, die Bleiplatten durch Tuchstreifen getrennt zu einer Spirale aufwickelte. Er findet die elektromotorische Kraft eines solchen Elements = 1,5 Bunsen (C. R. 49, p. 402, 1859; 50, p. 640, 1860; 66, p. 1255, 1869). Die Ersetzung der Tuchlappen durch Hartgummistreifen zur Isolation schlug Planté selbst vor (C. R. 74, p. 592, 1872). Um die auch von ihm beobachtete Eigentümlichkeit, daß Blei erst durch mehrere Ladungen zum Maximum der Kapazität ansteigt, wie es Sinsteden gefunden hatte, zu verwerten, gab er eine ausführliche Anweisung zur Vorbereitung. Auch so war der Plantésche Akkumulator noch nicht geeignet, die technische Wertung zu finden, die Planté in seinen Recherch. sur l'Électr. (1879) erhoffte, auf diese technische Weiterbildung des Prinzips ist hier nicht der Ort, näher einzugehen. Die ganze Entwicklung in Konstruktion und Anwendung ist in meinem Buche: Die Akkumulatoren für Elektrizität, 3. Aufl., p. 130—233, ausführlich gegeben. Ebenso hat man die verschiedensten Theorien für den Akkumulator versucht; auch diese finden sich ebenda.

Da es sich um die Elektroden PbO_2 und Pb und den Elektrolyten H_2SO_4 handelt, wo also die Ionen H und SO_4 gegeben sind, kann man den ganzen Chemismus in die Gleichung

$$PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb = 2PbSO_4 + 2H_2O$$

zusammenfassen, wie ich es in der ersten Auflage, p. 155, bereits getan habe, so daß bei der Ladung von rechts nach links, bei der Entladung von links nach rechts gelesen werden muß. In dieser Gleichung drückt sich wesentlich das Resultat der Arbeiten von Gladstone und Tribe aus (Elektrot. Ztschr. 1882, p. 332, und The Chemistry of the second. batt. of Planté a. Faure, 1883, deutsch 1884). Die Art, wie diese Reaktionen nun gedacht werden, ist in den verschiedenen Darstellungen verschieden; aber sicher sind alle die Theorien, welche schließlich nicht auf jene Gleichung kommen, unzulässig. Die Übersicht über diese Theorien findet sich in meinem Buche (p. 234—258).

Eine eigenartige Stellung nimmt der Aluminiumakkumulator ein. Schon Buff glaubte am Aluminium ebenso wie beim Eisen das sogenannte Passivwerden nachgewiesen zu haben (Ann. d. Chem. u. Pharm. 102, p. 296, 1857); v. Beetz aber zeigte, daß diese

Erscheinung mit dem Verhalten der Aluminiumplatte im Element gar nichts zu tun habe (Pogg. Ann. 127, p. 45, 1866). Ducrotet stellte mit einer Aluminiumanode und Platin in verdünnter Schwefelsäure ein Element her (C. R. 8, p. 280, 1875). Erst Graetz untersuchte diese Frage genauer und fand die sogenannte Drosselzelle. Die Anode ist Aluminium, die Kathode Kohle oder sonst eine indifferente Substanz. Solche Zelle nimmt dem hindurchgeleiteten Strome 22 V. an elektromotorischer Kraft. Ist die Spannung unter 22 V., so findet überhaupt kein Stromschluß statt, während in entgegengesetzter Richtung der Strom mit 1 V. Verlust durchgeht (Ztschr. f. Elektrochem. 4, p. 17, 1897). Pollak gelang es, mit einer Zelle in alkalischer Lösung 110 V. abzufangen (C. R. 124, p. 1443, 1897). Unter Anwendung solcher Zellen läßt sich dann aus Wechselstrom pulsierender Gleichstrom machen.

Von den verschiedenen Theorien, wie sich unter Zugrundelegung der obigen allgemeinen Bedingungsgleichung der Vorgang im Element vollzieht, hebe ich nur die von Le Blanc hervor, weil sie in verschiedenen Richtungen fruchtbar gewesen ist in der unserem Zeitabschluß folgenden Periode. Le Blanc (Lehrbuch der Elektrochemie, 1896, p. 222) faßt den Vorgang so auf: An der Anode sind vierwertige Bleiionen $\overset{++++}{Pb}$, welche die Hälfte ihrer Ladung an die Elektroden abgeben und zweiwertig mit den in der Lösung vorhandenen $\overset{--}{SO_4}$-Ionen zu $PbSO_4$ zusammentreten. An der Kathode geht metallisches Blei in zweiwertige Ionen über und diese $\overset{++}{Pb}$ bilden ebenfalls mit $\overset{--}{SO_4}$ auch hier $PbSO_4$. In dem Maße, wie diese Bildung vor sich geht, wird die Konzentration der Lösung an vier- und zweiwertigen Bleiionen geringer; statt dessen gehen PbO_2-Teile in Lösung, zerfallen, indem sie mit dem vorhandenen H-Ionen bilden: $PbO + H_2O$. Die PbO aber findet in den $\overset{+}{H}$-Ionen nud den $\overset{--}{SO_4}$-Ionen nun die Möglichkeit, $PbSO_4 + H_2O$ zu bilden. Für den Ladungsprozeß, wo durch die Entladung beide Platten mit $PbSO_4$ bedeckt sind, ist anzunehmen, daß $\overset{++}{Pb}$-Ionen an beiden Platten vorhanden sind, die an der Anode zu vierwertigen übergehen, an der Kathode zu metallischem Blei. Die vierwertigen Pb-Ionen bilden dann mit O das PbO_2 und die $\overset{--}{SO_4}$-Ionen bilden mit $\overset{+}{H}$ wieder die in der Lösung vorhandenen Ionen.

Beziehung zur Temperatur.

Für alle galvanischen Elemente ist der Zusammenhang mit der Wärme von entscheidender Bedeutung. Schon bei Einführung des Begriffs der Wärmetönung durch J. Thomsen (s. oben) entstand die Aufgabe, die in den Elementen stattfindenden chemischen Vorgänge thermodynamisch zu berechnen und dadurch ein Urteil über die wirklich stattfindenden Vorgänge zu bilden. Es kann nicht meine Aufgabe sein, die Resultate solcher Rechnungen und Messungen im einzelnen anzuführen. Favre hat sich seit 1854 (Ann. de Chim. et de Phys. 40, p. 293, und C. R. 47, p. 599, 1858) jahrelang darum bemüht, ebenso sind von Braun seit 1878 in Wied. Ann. sehr viele Resultate veröffentlicht. Man hat dabei zu unterscheiden die Gesamtwärme, d. h. die, welche die chemischen Prozesse darstellen würden, wenn kein Strom vorhanden wäre; 2. die Joulesche Wärme, d. h. die, die im Leitungskreise durch den Strom erzeugt wird; die Differenz dieser beiden Wärmen ist die sekundäre Wärme, oder nach Duhem (C. R. 104, p. 1697, 1887) kompensierte Wärme $= W_s$. Mit dieser Frage beschäftigt sich eingehend Gibbs (Thermodynamik 1873, deutsch von Ostwald 1892, p. 387ff.), desgleichen Helmholtz (Ber. Berlin 1882, p. 825). Für W_s leitet Helmholtz nun die Gleichung ab $W_s = - T \frac{\partial E}{\partial T}$, wo T die absolute Temperatur, E die elektromotorische Kraft ist und eine analoge Gleichung ist von Gibbs gegeben (Rep. Brit. Ass. 1887). Ist dies $W_s = 0$, dann ist die elektromotorische Kraft von der Temperatur unabhängig; das trifft zu beim Czapskischen Element. Die Helmholtzsche Gleichung ist durch mehrere Versuche bestätigt.

Kapillarelektrometer.

An diese Untersuchungen schließen die Polarisationserscheinungen beim Quecksilber an, die um deswillen so interessant, aber auch schwierig zu lösen waren, weil hier die elektrische Spannung mit der Oberflächenspannung in Verbindung tritt. Schon Henry hat beobachtet, daß, wenn die —-Elektrode Hg ist in angesäuertem Wasser, die Oberflächenform des Quecksilbertropfens sich ändert (Gilb. Ann. 6, p. 370, 1800). Unter Übergehung der vielen nachfolgenden Versuche, die nichts wesentlich Förderndes beibrachten, hebe ich nur einige heraus, die wertvoller waren. Erman bringt auf eine Hg-Oberfläche einen Tropfen angesäuerten Wassers. Wird das Hg mit dem —-Pol, H_2O mit dem + verbunden, so zieht sich

der Tropfen zusammen und wird mehr kugelförmig; kehrt man den Strom um, so wird der Tropfen sich abgeplattet auf dem Hg ausbreiten; hängt man die Stromzuführung zum Tropfen an einen Wagearm, so hebt sich derselbe im ersten Falle und senkt sich im zweiten (Gilb. Ann. 32, p. 261, 1809). In derselben Arbeit bringt Erman einen Quecksilbertropfen in ein 1 cm weites, horizontales Glasrohr, welches im übrigen mit verdünnter H_2SO_4 gefüllt ist; so wird, wenn durch zwei Platindrähte Strom eingeführt ist, der Hg-Tropfen sich nach dem —-Draht hin ausbreiten, er überzieht sich auf dieser Seite mit $HgSO_4$, die Schicht platzt und der Quecksilbertropfen springt in Richtung auf die —-Elektrode vor. Besonders deutlich zeigt diesen Versuch J. Herschel (Phil. Trans. 1824, p. 162), er bringt den Hg-Tropfen bis zur Berührung mit der —-Elektrode. Während die meisten Beobachter dieser Erscheinung sich mit sekundären Vorgängen befaßten, die, wie Schweigger sehr richtig bemerkt (Schweigg. Journ. 48, p. 324, 1826), mit der Stromwirkung gar nichts zu tun haben, zeigte Raoult (Ann. de Chim. et de Phys. 2, p. 365, 1864), daß die Polarisation des Hg größer ist als die des Platins. Speziell die Polarisation durch H untersuchte Crova (Mondes 5, p. 210, 1864) und Varley (Phil. Trans. 161, p. 129, 1871).

Diese Versuche führten Lippmann dazu, ein sehr empfindliches Kapillarelektrometer zu konstruieren (C. R. 76, p. 1407, 1873). Er zeigte, daß die Kapillarkonstante des Hg durch die Polarisation mit H wesentlich geändert wird. Bezeichnet E die Ladung auf der Oberflächeneinheit, T die Oberflächenspannung für die Längeneinheit, P die Spannungsdifferenz zwischen Hg und dem Elektrolyten an der Begrenzung, so leitet Lippmann die Beziehung ab $\frac{\partial^2 T}{\partial P^2} = - \frac{\partial E}{\partial P}$. Das Hg nimmt, wenn es Kathode ist, durch die H-Polarisation an Kapillarspannung zu (Ann. de Chim. et de Phys. 5, p. 494, 1875). Diese Zunahme bewirkt in dem Elektrometer eine mit dem Mikroskop beobachtbare Hebung einer Quecksilbersäule. Die Änderung der Kapillarkonstanten in Abhängigkeit von der Polarisation bzw. von der Stromstärke hat sehr ausführlich Quincke untersucht (Pogg. Ann. 153, p. 189, 1874). Helmholtz behandelt diesen Vorgang unter dem Gesichtspunkt eines Ladungsstromes und kommt zu einer der Lippmannschen Gleichung entsprechenden Formulierung (Ber. Berlin 1881, p. 945). Die experimentellen Ausführungen hierzu lieferte A. König (Wied. Ann. 16, p. 1, 1882). Daß man den Vorgang auch als Leitungsstrom auffassen kann,

zeigt Gibbs (Trans. Connecticut Acad. 3, p. 380 u. 506, 1878) und unabhängig davon Warburg (Wied. Ann. 41, p. 1, 1890). Seine Erklärung der Polarisation des Hg beruht darauf, daß 1. der Elektrolyt in der Nähe der Elektroden Quecksilbersalz gelöst enthält; 2. daß vor der Polarisation eine Verdichtung dieses Salzes auf der Oberfläche der Elektroden stattfindet; 3. daß der Polarisationsstrom wesentlich ein Leitungsstrom ist, der die Oberflächendichte des Quecksilbersalzes ändert. So ist an der Kathode die Dichte kleiner als im unpolarisierten Zustande.

Die Empfindlichkeit des Kapillarelektrometers veranlaßte Siemens, demselben eine bequemere Form zu geben, wo die Verschiebung eines Tropfens beobachtet wird (Ber. Berl. 1874, p. 157) und ebenso Ostwald, wo die Verschiebung der Quecksilbersäule in dem Kapillarrohr beobachtet wird (Ztschr. f. phys. Chem. 1, p. 403, 1887). Eine Kritik der Kapillarelektrometer, besonders auch ihrer starken Abhängigkeit von der Temperatur, gibt Paschen (Wied. Ann. 39, p. 43; 40, p. 38, 1890) und Duhem (C. R. 104, p. 54, 1887).

Die Warburgsche Arbeit benutzte auch Erfahrungen an Tropfelektroden. Die Resultate Warburgs waren durch Versuche von G. Meyer unterstützt (Wied. Ann. 45, p. 508, 1892).

Die Tropfelektroden sind wohl zuerst von Varley (Phil. Trans. 161, p. 129, 1871) beobachtet, sind aber erst durch Quincke näher untersucht, wobei festgestellt wurde, daß die elektromotorische Kraft wesentlich von der Leitfähigkeit des Elektrolyten abhängt (Pogg. Ann. 153, p. 161, 1874). Einen gewissen Abschluß bilden die ausgedehnten Versuche Paschens über die Tropfelektroden, wo er die Substanzen weitgehend geändert hat (Wied. Ann. 41, p. 42 u. 186, 1890; 43, p. 568, 1891).

Magnetismus und Elektrizität.

Ablenkung der Magnetnadel.

Es sind die ersten Beobachtungen der Ummagnetisierung einer Nadel durch den Blitz schon erwähnt. Franklin suchte mit unsicherem Erfolge die Erscheinung mit Entladungen von Verstärkungsbatterien zu erzeugen (Exp. a. Obs., p. 91). Wilke dagegen konstatierte, daß der Entladungsfunke eine Eisen- bzw. Stahlnadel in der Nähe eines Magneten so magnetisiere, als ob die Nadel den Magnetstab berührt hätte (Abh. Stockholm 1766, deutsch p. 36).

Genauer untersuchte v. Marum diese Magnetisierung durch den Entladungsfunken und fand, daß derselbe nur erschütternd wirke, da die Nadel stets die Polarität erhalte, welche das magnetische Feld der Erde vorschreibt (Beschr. einer groß. Elektr.-Masch., 1786, p. 36). Nachdem der Galvanismus entdeckt war, versuchten viele, durch ihn einen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus aufzufinden. Ich übergehe diese vergeblichen Versuche Ritters, v. Arnims, Gautherots usw. Wenn von den Italienern Libri und Configliacchi behauptet wird, daß Romagnosi die Ablenkung der Nadel durch den Strom 1802 entdeckt habe, so hat die sorgfältige Untersuchung Erlenmeyers und Levinsteins gezeigt, daß das ganz grundlos ist (Krit. Ztschr. f. Chem. 2, p. 242, 1859).

Oersted (1772—1851) hatte schon 1812 die Vermutung ausgesprochen, daß „die elektrischen Kräfte in einem von den Zuständen, wo sie sehr gebunden vorkommen, einige Wirkungen auf den Magneten als Magnet hervorbringen könnten" (Ansichten d. chem. Naturgesetze, 1812, p. 251). Als solchen wirksamen Zustand glaubte er glühenden Platindraht in einem Kettenschluß ansehen zu dürfen und hielt dies Stück seiner Leitung über eine auf einer Stahlspitze drehbare Nadel. Er sah wohl Ablenkungen, aber undeutlich. Er wiederholte nach einiger Zeit diese Versuche mit einem Becherapparat von 20 Elementen und fand damit die Ablenkung der Nadel aus dem magnetischen Meridian durch den über und unter und in entgegengesetzter Richtung fließenden Strom, so daß bei $^3/_4$ Zoll Abstand des Drahtes von der Nadel 45^0 Ablenkung eintrat. Die Ergebnisse seiner Untersuchung machte Oersted durch eine lateinische Monographie, am 21. Juli 1820 an alle namhaften Physiker verschickt, bekannt, abgedruckt wurde sie in Schweigg. Journ. (29, p. 275, 1820) und in einer deutschen, etwas vollständigeren Abhandlung (ib., p. 364). In dieser deutschen Abhandlung vom August 1820 gibt Oersted bereits neue Erfahrungen: 1. Daß die magnetische Wirkung von der Stromstärke abhänge. 2. Daß sich das Experiment auch umkehren lasse, d. h. daß ein beweglicher Stromkreis von einem festen Magneten in Bewegung gesetzt werde. Für diesen letzten Versuch hat Oersted ein kleines Element an einem Faden aufgehängt, durch einen Kreisbügel geschlossen und durch Magnete in Drehung versetzt. Eine Entdeckung, die gewöhnlich Ampère zugeschrieben wird. Erman und Raschig gaben dem Apparat eine größere Beweglichkeit. Oersted gibt in dieser Arbeit auch an, daß bei der Ablenkungsanordnung durch Vergrößerung der Elektroden eine stärkere Wirkung als durch

Vermehrung der Elemente erreicht werde. Schon Ritter hatte diesen Unterschied (s. oben) erkannt für physiologische und Wärmewirkungen.

Arago brachte von der Naturforscherversammlung in Genf, wo De la Rive die Oerstedschen Experimente vorgeführt hatte (September 1820) die Kunde mit nach Paris und stellte mit Gay-Lussac analoge Versuche an; sie fanden, daß der Strom nicht nur ablenke, sondern auch magnetisiere, wenn sie eine Stahlnadel in die vom Strom durchflossene Drahtspirale steckten; der Schließungsdraht zog Eisenfeilspäne an und stellte sie senkrecht zu seiner Richtung, auch wenn dieser Draht nicht Eisen, sondern Kupfer oder Messing war (Ann. de Chim. et de Phys. 15, p. 93, 1820).

Seebeck zeigte am 14. Dez. 1820 der Berliner Akademie, daß durch Streichen einer Stahlnadel senkrecht zur Richtung des Stromes auf dem Kupferdraht Magnetisierung erreicht werden könne (Abh. Berl. 1820, p. 289). Am 13. September 1820 zeigte Schweigger einer Naturforscherversammlung in Halle zum ersten Male einen Multiplikator aus mit Seide und Wachs isoliertem Kupferdraht in elliptischer Wicklung. Gleichzeitig mit ihm baute auch Poggendorff einen solchen Multiplikator (Umrisse zu den physischen Verhältnissen usw., Berlin 1821; Allg. Lit.-Ztg., Nr. 296, Nov. 1820).

Seebeck, welcher mit dem Schweiggerschen Apparat arbeitete, gab ihm den Namen Multiplikator (l. c.), bemerkt aber dabei, daß die größere Länge des Drahtes die Wirkung schwäche. Die Bedeutung der Parallelschaltung und der Nacheinanderschaltung ist von Schmidt ausführlich begründet (Gilb. Ann. 70, p. 230, 1822).

Am erfolgreichsten bei der Fortführung der Oerstedschen Entdeckung war Ampère (1775—1836). Vom 18. September bis 2. November 1820 hat er in jeder Sitzung der Akademie neue Resultate vorlegen können. Er bestimmt zunächst als Stromrichtung in der Leitung die der strömenden +-Elektrizität und spricht seine oft nicht genau zitierte Regel so aus: Si l'on se place par le pensée dans la direction du courant, de manière qu'il soit dirigé des pieds à la tête de l'observateur, et que celuici ait la face tournée vers l'aiguille; c'est constamment à sa gauche que l'action du courant écartera de sa position ordinaire celle de ses extrémités qui se dirige vers le nord. Er zeigt, daß diese Regel für alle Teile der Stromleitung auch innerhalb des Elementes (der Kette) gültig ist (Ann. de Chim. et de Phys. 15, p. 59 u. 170, 1820, spez. p. 67). In § 4 der Arbeit zeigt Ampère, daß zwei gleich gerichtete, parallele Ströme einander anziehen, zwei entgegengesetzte, parallele Ströme

einander abstoßen; dazu konstruierte er die bekannten beweglichen Drahtbügel in dem Gestell. Nun ersetzte er den Magneten durch eine Drahtspirale, welche nach außen ebenso wirkte wie ein Magnetstab, dessen Pole nach der Ampèreschen Regel leicht bestimmt werden (l. c. 371). Dann zeigt Ampère, daß auch der Erdmagnetismus einen drehbaren Strombügel ebenso einstellt, wie Oersted es durch einen Stabmagneten beobachtet hatte.

Um die Ablenkung auch bei schwächsten Strömen beobachten zu können, sieht er ein, daß das erdmagnetische Feld unwirksam gemacht werden muß; er astasiert die Nadel dadurch, daß er die Drehachse in die Richtung der Inklinationsnadel bringt (l. c. 199). Im folgenden Jahre wendet er aber schon das bekannte, astatische Nadelpaar an mit entgegengesetzter Polarität (ib. 18, p. 320, 1821).

Nun schließ er, daß die magnetischen Erscheinungen begründet sind durch das Vorhandensein elektrischer Ströme in der Erdkugel und in dem Magneten (ib., p. 201). Es braucht nicht ein einziger Erdstrom zu sein, sondern es können viele sein, wenn nur ihre Wirkung aufeinander und nach außen sich ersetzen läßt durch einen von Ost nach West fließenden Strom um die ganze Erde. Die Entstehung dieser Erdströme denkt sich Ampère galvanisch durch die verschiedenen sich in der Erde berührenden Substanzen. „Es müßte sogar ausdrücklich in der Absicht, daß keine Wirkung entstehen solle, die Anordnung speziell getroffen sein, daß nicht nach irgendeiner Richtung hin ein elektrischer Strom entstehen müßte. Ebenso hat man den Magneten aufzufassen: comme un assemblage de courans électriques qui ont lieu dans des plans perpendiculaires à son axe, dirigés de manière que le pole austral de l'aimant, qui se porte du côté du nord, se trouve à droite de ces courans, puisqu'il est toujours à gauche d'un courant placé hors de l'aimant, et qui lui fait face dans une direction parallèle. Und zwar sind diese Molekularströme la cause unique aller magnetischen Erscheinungen.

In derselben Arbeit hatte Ampère auch den Vorschlag gemacht, mit Hilfe der Oerstedschen Entdeckung zu telegraphieren, indem für jeden Buchstaben ein Leitungsdraht zu einer Magnetnadel führt und von dort alle Drähte durch gemeinsame Rückleitung zum Element geschlossen werden, wenn im Aufgabeort durch eine Taste der Stromschluß hergestellt wird (l. c., p. 73). In der Fußnote gibt Ampère an, daß Arago ihn auf die Ähnlichkeit seines Vorschlages mit dem elektrochemischen Telegraphen

Sömmerings (Schweigg. Journ. 2, p. 217, 1811, und Gilb. Ann. 39, p. 478) von 1809 aufmerksam gemacht habe. Sömmerings Telegraph befindet sich im Deutschen Museum in München.

Endlich ist aus dieser Arbeit noch wichtig, daß Ampère auseinandersetzt, daß eine Stromspirale nicht nur wie eine Summe von Kreisströmen wirkt, sondern auch wie ein in Richtung der Wickelung laufender geradliniger Strom, und er zeigt, wie man diese Störung bequem beseitigen kann (l. c. 174). In dieser Arbeit hat Ampère freilich noch nicht von Molekularströmen in Magneten gesprochen, sondern nimmt noch an, daß die Ströme alle konzentrisch zur Achse liegen.

Gleichzeitig (30. 10. 1820) fand Biot, unterstützt von Savart, durch Versuche und Überlegung das Gesetz, daß die von einem linearen Strome auf einen Magnetpol wirkende Kraft senkrecht ist auf dem vom Magnetpol auf den Strom gefällten Lote und senkrecht auf dem Strome. Die Intensität der Kraft ist umgekehrt proportional der Distanz des Poles von dem Strome (Ann. de Chim. et de Phys. 15, p. 222, 1820). Die Ableitung dieses Biot-Savartschen Gesetzes hat Schmidt auf die Voraussetzung gegründet, daß jeder einzelne Punkt des Stromes die Pole der Nadel im umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Entfernung abstoße und daß der Strom unendlich groß geradlinig sei (Gilb. Ann. 71, p. 389, 1822).

Am 10. 11. 1820 machte Arago (1786—1853) im Moniteur universel, No. 315, in einer kurzen Notiz bekannt, daß es ihm gelungen sei, durch elektrische Funken ebenfalls Stahlnadeln zu magnetisieren. Nahezu an demselben Tage schrieb Davy an Wollaston einen Brief, der die gleiche Entdeckung meldete (Gilb. Ann. 71, p. 225, 1822). Endlich führte am 11. 11. 1820 Yelin der Münchener Akademie den Versuch vor, daß ein Draht, um eine Glasröhre in weiter Spirale herumgeführt, eine in der Röhre liegende Stahlnadel magnetisiere, wenn durch die Spirale die Funkenentladung einer Kleistschen Batterie ging. Er macht auch auf Rechts- und Linksgewinde zuerst aufmerksam (ib. 66, p. 406, 1820).

Am 11. 9. 1821 erschien im Journ. de l'Inst. roy. die erste Arbeit Faradays über die Wechselwirkung von Strom und Magnetismus (Ann. de Chim. et de Phys. 18, p. 33, 1821). Faraday (1791—1867) entnahm den Strom einem Hareschen „Kalorimotor“. Dies war ein Trogapparat mit alternierenden Cu- und Zn-Platten in angesäuerter Kochsalzlösung, wo alle Cu-Platten an eine Leiste, alle Zn-Platten an eine andere Leiste gelötet waren; er wurde Kalori-

motor genannt, weil diese großen Elektroden zum Schmelzen und Glühen von Metalldrähten besonders geeignet sind (Ann. of Phil. 1, p. 829, 1819). Eine andere Form gab Hare diesem Element, indem er die großen Cu- und Zn-Platten, getrennt durch einen Tuchlappen, zu einer Rolle aufwickelte; diese Form ist als Haresche Spirale in den älteren Lehrbüchern bezeichnet, sie ist das Vorbild für den ersten Plantéschen Akkumulator gewesen.

Faraday kam bei Wiederholung der Ampèreschen Versuche auf die Idee, ein Magnet müsse einen Stromteil zum Rotieren bringen. Um das nachzuweisen, ließ er am Boden eines Gefäßes, in welches etwas Quecksilber geschüttet war, einen kleinen Magneten befestigen, hing von oben an einer Drahtöse einen leicht beweglichen Messingdraht, in das Hg eintauchend, auf und schickte nun den Strom seines Elements durch diesen Draht und das Quecksilber. Sofort rotierte der Messingstift um den Pol; umgekehrte Rotation trat ein, wenn die Stromrichtung oder der Pol des Magneten umgekehrt wurde. Ebenso gelang ihm das umgekehrte Experiment: Ein durch Platin beschwerter, frei aufrecht schwimmender Magnet rotierte um einen festen Leitungsdraht. Ampère erweiterte dies Experiment dahin, daß auch eine Drahtspirale den Magneten ersetzen durfte und daß ein aus vier Armen bestehender Bügel auch durch den Erdmagnetismus zur Rotation gebracht wurde (ib., p. 331).

Die Erklärung dieser Experimente veranlaßte Ampère, seine Theorie des Magnetismus präzise so zu fassen: Im Eisen, Nickel und Kobalt bestehen um die Moleküle elektrische Ströme, die „avant l'aimantation" in den verschiedensten Richtungen liegen, so daß keinerlei Polarisation dabei zu bemerken ist. Die Magnetisierung besteht darin, daß diese Molekularströme alle gleich gerichtet werden. Ist es Stahl, so bleiben die Ströme gleich gerichtet, ist es Eisen, so nehmen sie nach Aufhören der magnetisierenden Kraft die frühere Lage wieder ein (Journ. de Phys. 93, p. 448, 1821, und Rec. d'observat. electro-dynam., 1822).

Nun gelang es auch Ampère, einen vom Strom durchflossenen Magneten zur Rotation um seine eigene Achse zu bringen (Ann. de Chim. et de Phys. 20, p. 68, 1822). Er weist darauf hin, daß alle diese Rotationserscheinungen durch richtige Anwendung seiner Regel erklärbar seien. Endlich gibt ihm seine Annahme der Molekularmagnete die Möglichkeit, die schon von Gilbert beobachtete Lage des Poles eines Magneten in einem Abstand von dem Ende = etwa ein Neuntel der Länge zu erklären (ib., p. 404).

Solche Rotationserscheinungen fand Davy nun auch in flüssigen Leitern, indem er in ein Metallgefäß Quecksilber goß, in die Mitte einen Leitungsdraht tauchte und das Gefäß mit dem anderen Pol des Elements verband. Sobald er nun über dies Gefäß einen Magnetpol hielt, rotierte das Quecksilber (Phil. Trans. 1823, II, p. 183). Schon zwei Jahre früher hatte Davy die Ablenkung bzw. die Rotation eines Lichtbogens durch einen Magneten gezeigt (Phil. Trans. 1821, und Gilb. Ann. 71, p. 244, 1822). Dieser Lichtbogen ist aber nicht eine Erfindung von Davy, wie man aus der überall gebräuchlichen Bezeichnung „Davyscher Lichtbogen" schließen muß, und wie es bis in die neueste Zeit immer wieder behauptet wird. Schon Ritter hatte, wie oben erwähnt, festgestellt, daß der Öffnungsfunke sehr viel intensiver sei, wenn man eine Kohlenspitze von der metallischen Leitung abhebe. Dann zeigte De la Rive am 27. 7. 1820 auf derselben Naturforscherversammlung, wo er die Oerstedsche Entdeckung vorführte, mit 380 Cu-Zn-H_2SO_4-Elementen zwischen zwei stumpfen Kohlenspitzen einen dauernden Lichtbogen, so daß „alle geblendet wurden" (Bibl. univ., Aug. 1820). Davy benutzte freilich 2000 Elemente, aber hatte die gleiche Anordnung wie De la Rive. Neu an dem Davyschen Versuch ist nur die Ablenkung oder Rotation durch den Magneten, ferner die Feststellung, daß die +-Spitze ausgehöhlt wurde, während sich an der —-Kohle Schutt und Schlacken anhäuften, wenn der Bogen im luftverdünnten Raume erzeugt wurde. Daß der Lichtbogen daher als ein Transport glühend gewordener kleiner Kohlenteile anzusehen sei, erklärte Casselmann (Pogg. Ann. 60, p. 381, 1843). Diesen Transport wies v. Breda nach (ib. 70, p. 326, 1847).

Die Rotationserscheinung zeigte Ampère auch an zwei Stromkreisen und dies Experiment ist der Ausgangspunkt zu seinem Grundgesetz der Elektrodynamik. Hier wird diese Bezeichnung zum ersten Male gebraucht (Ann. de Chim. et de Phys. 20, p. 60, 1822, die vollständige Ableitung in Mém. Paris 1823, p. 184). Er nimmt an, daß zwei Stromelemente ds und ds' mit den Intensitäten i und i' in der Entfernung r aufeinander wirken mit einer Kraft

$$= \varrho \cdot i\, i'\, ds \cdot ds' / r^n \, .$$

Durch geeignete Wahl der Intensitätsmessung kann man bei paralleler Lage der Stromelemente dafür sorgen, daß $\varrho = 1$ ist. Machen dann ds mit r den Winkel ϑ und ds' mit r den Winkel ϑ' und machen

ds und ds' im Raume den Winkel ε, so ergibt sich unter der ferneren Annahme, daß zwei aufeinander senkrechte Ströme keine Wirkung aufeinander haben, durch Zerlegung in Komponenten die Kraft

$$w = \frac{i \cdot i' \cdot ds \cdot ds'}{r^n} (\cos \varepsilon + h \cos \vartheta \cdot \cos \vartheta')$$

(l. c., p. 204). Um h und n zu bestimmen, untersucht Ampère die Gleichgewichtslagen bei geschlossenen Strömen bzw. unendlich langen Strömen; er findet dadurch $n = 2$ und $h = -3/2$, also

$$w = \frac{ii' \cdot ds \cdot ds'}{r^2} (\cos \varepsilon - 3/2 \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \vartheta')$$

oder

$$= \frac{ii' \cdot ds \cdot ds'}{r^2} \left(r \frac{d^2 r}{ds \cdot ds'} - \frac{1}{2} \frac{dr}{ds} \cdot \frac{dr}{ds'} \right)$$

(l. c., p. 232). Das ist das Ampèresche Grundgesetz der Elektrodynamik, der Ausgangspunkt der ganzen Lehre von der Elektrodynamik. Ampère macht zum Schlusse dieser langen Arbeit noch die Überlegung, daß ein Magnet stets zu ersetzen ist durch eine Stromspirale und führt hier zum ersten Male die Bezeichnung Solenoid ein.

Elektromagnetische Meßapparate.

Die Multiplikatoren von Schweigger und Poggendorff wurden wesentlich verbessert durch Nobili, der die Ampèreschen astatischen Nadeln mit je einer Drahtwicklung umgab, die entweder Rechts- und Linksgewinde waren, oder bei gleicher Wicklung von Strom in entgegengesetzter Richtung durchlaufen waren (Bibl. univ. 29, 1825). Daß solche Apparate zur absoluten Messung nicht geeignet waren, hätte das Biot-Savartsche Gesetz schon klar machen müssen; allein erst Pouillet gab in seiner Tangentenbussole einen Apparat, welcher eine wirkliche Vergleichung zweier Stromstärken lieferte (Pogg. Ann. 42, p. 281, 1837). Er hatte einen 1,6 m langen Kupferstreifen von 2 cm Breite und 0,2 cm Dicke zu einem Kreise gebogen, die Enden desselben mit Quecksilbernäpfchen verbunden und an einem Kokonfaden eine kleine Magnetnadel im Mittelpunkt des Kreises aufgehangen. Ist T die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus, i die Stromstärke, φ der Ablenkungswinkel der Nadel, wenn der Strombügel im magnetischen Meridian steht, so setzt er

$$T \sin \varphi = i \cos \varphi .$$

Er macht den Strombügel dann drehbar und will, um schwächere Ströme genauer zu messen, den Bügel der abgelenkten Nadel nachdrehen; dann ist das Drehungsmoment gleich *i*. Aber dabei hat Pouillet die Kreisform des Bügels aufgegeben und ein Rechteck daraus gemacht, um der Nadel möglichst nahe zu kommen. Ein Beweis, daß Pouillet die Wirkung nicht richtig verstanden hatte. Poggendorff stellte die Kreisform wieder her (ib. 50, p. 504, 1840).

Eine Theorie der Tangentenbussole gab W. Weber (1804—1891) und zeigte, unter welchen Bedingungen die Proportionalität der Intensität mit der Tangente des Ablenkungswinkels gesichert ist. Die Tangentenformel ist als Näherungsmethode noch zulässig, wenn die Länge der Nadel den fünften Teil des Durchmessers nicht überschreitet, und die Fehler in der Ablesung werden am kleinsten, wenn der Ablenkungswinkel nahezu 45° beträgt (Result. aus d. Beob. des magn. Vereins, 1840, p. 48 u. 86).

Andere Formen der Tangentenbussole sind von Nervander mit seitlich angebrachter Stromrolle (Pogg. Ann. 59, p. 204, 1843) und von Helmholtz (Verhandl. d. phys. Vereins, 16. März 1849) mit zwei parallelen Stromkreisen und der Nadel in dem mittleren Abstand und von Gaugain mit einer um den halben Radius des Stromkreises verschobenen Nadel (C. R. 36, p. 191, 1853) vorgeschlagen. Um völlige Konstanz der Wirkung des Stromes auf die Nadel zu bekommen, wickelt Riecke (1845—1915) den Draht auf ein Ellipsoid (Wied. Ann. 3, p. 36; 4, p. 226, 1878). Oberbeck nimmt zwei verschieden große, konaxiale Drahtspulen, verschiebbar auf der Achse, die zum Meridian senkrecht ist, und wendet die Nullmethode zur Messung an (ib. 42, p. 502, 1891). Daß die Gaugainsche Methode und ebenso die Helmholtzsche für absolute Messungen wenig geeignet sind, hatte schon die Berechnung von Bravais (C. R. 36, p. 193, 1853) ergeben, ausführlicher und unter Vermeidung eines Fehlers in der Bravaisschen Rechnung ist es von Jacobi (Bull. Petersburg 16, p. 89, 1858) und Mascart (Journ. de Phys. 1, p. 222, 1882) gezeigt. Daraufhin gab F. Kohlrausch (1840—1910) eine Konstruktion der Tangentenbussole, welche für absolute Bestimmungen geeignet ist (Wied. Ann. 15, p. 552, 1882). Endlich verband Quincke mit der Tangentenbussole auch die Spiegelablesung (ib. 48, p. 24, 1893), welche von Poggendorff zuerst eingeführt war (Pogg. Ann. 7, p. 121, 1826), doch erst durch Gauss bei den erdmagnetischen Messungen weitgehend gebraucht und dadurch in alle Kulturländer verbreitet wurde (Gött. Anz. 1833, Nr. 205).

Der Name Galvanometer ist zuerst für Apparate gebraucht, die die Stärke des Stromes durch chemische Wirkungen messen wollen, von Robertson (Journ. de Paris 1800, Nr. 362) und Maréchaux (Gilb. Ann. 11, p. 123, 1802). Erst durch die Konstruktion eines „Differentialgalvanometers" durch Becquerel (Ann. de Chim. et de Phys. 32, p. 420, 1826) ist der Name Galvanometer für die Multiplikatoren (s. oben) eingeführt, doch wurde er erst allgemein durch die Einführung des Spiegelgalvanometers von W. Weber (Elektrod. Maßbest., I, 1846, p. 17). Er hatte einen magnetisierten Stahlspiegel an einem Kokonfaden in der Mitte einer kupfernen Hohlkugel aufgehängt. Ein Loch in der Kugel gestattete, die Schwingungen des Spiegels mit Fernrohr und Skala zu beobachten. Eine Stromspule wirkt aus gemessener Entfernung ablenkend auf den magnetischen Spiegel. Dann änderte er das Galvanometer so ab, daß er die Kupferhülle ellipsoidisch gestaltete und auf diese von beiden Seiten Messinghülsen schieben konnte, die mit Drahtwicklung versehen waren (Abhandl. Leipzig I, 1852, p. 199).

Prinzipiell unterscheidet sich das Wiedemannsche Galvanometer nicht von diesem Weberschen (Pogg. Ann. 89, p. 504, 1853); an demselben brachte Wiedemann dann nach dem Vorschlage Haüys einen festen Magneten zur Aufhebung des Erdmagnetismus an. Ebenso ist das Meyersteinsche Galvanometer nach dem Weberschen Vorbild konstruiert (ib. 114, p. 532, 1861). Auch ohne Astasierung ist das Galvanometer von Siemens (1816—1892) aperiodisch; er gibt dem Magneten die „Glockenform" und läßt denselben in einer massiven Kupferkugel schwingen, in welche ein so tiefes und breites Loch gebohrt ist, daß der vertikal herabhängende Magnet sich eben frei bewegen kann und die beiden Pole an den Enden der Zinken um den Mittelpunkt der Kugel sich bewegen (Ber. Berliner Akad. 1873, p. 748).

Thermoströme.

Soweit die Thermoströme zur Messung der Temperatur benutzt sind, haben wir sie im Kapitel der Wärmemessung erwähnt. Sie sind aber auch als Stromquellen wertvoll gewesen und wegen der Konstanz noch heute wichtig. Schon in der Elektrostatik hatte es sich gezeigt, daß Temperaturunterschiede von Einfluß auf die Elektrizitätserregung sind. Franklin rieb einen warmen und einen kalten Harzstab aneinander, dann wurde der wärmere —, der kältere + (Exp. a. Observ. 1769, p. 403). Solche Versuche

sind bis in die Neuzeit fortgesetzt, z. B. von Knott mit Eisen, Kupfer, Zink und Zinnplatten, wo kalte und warme Platten, aufeinander gelegt, die warmen — luden (Proc. Edinb. 1879/80, p. 362). Ritter legte eine heiße Zn-Stange auf eine kalte, während die anderen Enden einen präparierten Froschschenkel berührten; dann zuckte der Schenkel, und zwar ging der Strom von dem heißen Stück zum kalten in der Berührungsstelle (Beweis, daß ein beständiger Galvanismus usw., 1798, und Gilb. Ann. 9, p. 292, 1801). Ähnliche Versuche, jedoch ohne Froschschenkel, sondern mit dem Multiplikator wurden von Becquerel an Platindrähten gemacht mit gleichem Resultat (Ann. de Chim. et de Phys. 23, p. 140, 1823). Bei Ausdehnung dieser Versuche auf eine große Reihe von Metallen zeigten sich viele Unregelmäßigkeiten, z. B. bei Nobili (Bib. univ. 37, p. 119, 1828). Das ist nicht verwunderlich, da geringe Ungleichheiten in Härte oder Oberflächenbeschaffenheit die Erscheinung wesentlich beeinflussen, wie Becquerel nachgewiesen hat (Ann. de Chim. et de Phys. 31, p. 357, 1829). Eine Reihe zuverlässiger Daten ist durch die Untersuchung von Magnus (1802 bis 1870) gegeben (Pogg. Ann. 83, p. 469, 1851), wobei sich besonders heraushebt, daß Quecksilber für Temperaturunterschiede unempfindlich ist, was Matteucci auch schon gefunden hatte (Pogg. Ann. 44, p. 629, 1838, und 47, p. 600, 1839) und was E. Becquerel auf andere Flüssigkeiten ausdehnte (Ann. de Chim. et de Phys. 8, p. 392, 1866).

Wesentlich hiervon verschieden sind die Thermoströme, welche Seebeck 1821 entdeckte. Er faßte den Strom als eine magnetische Polarisation auf und hielt den feuchten Leiter für überflüssig, wenn man nur dafür sorge, daß die Berührungsstellen verschieden seien. Er verband eine Antimon- und eine Kupferscheibe mit der Zuleitung zu einem Multiplikator; legte er die Platten einfach aufeinander, so fand er keinen Strom, sobald er aber den Kupferdraht mit der Hand an die Antimonscheibe drückte, erhielt er Strom und stellte alsbald fest, daß die Erwärmung durch die Hand die Ursache sei. Er findet die Temperaturdifferenz der beiden Berührungsstellen als das Entscheidende. Abkühlung durch Kältemischung erzeugt einen entgegengesetzten Strom wie Erwärmung an der gleichen Berührungsstelle. Die Proportionalität der Stromstärke mit der Temperaturdifferenz gilt nur in bestimmten Grenzen; wird die Differenz zu groß, so tritt ein Stillstand der Stromzunahme ein (Abhandl. Berlin 1822/23, p. 265). Er stellt nun eine thermoelektrische Reihe auf von Wismut bis Tellur, so daß in der er-

wärmten Berührungsstelle die +-Elektrizität vom oberen zum unteren fließt. Spätere Versuche, wie die von Hankel (Pogg. Ann. 62, p. 197, 1844) und Thomson (Rep. Br. Ass. 1855) haben im wesentlichen diese Reihe bestätigt. Seebeck findet auch, daß die Größe der Berührungsfläche keine Rolle spielt, was Magnus bestätigte (Pogg. Ann. 83, p. 469, 1851). Der Versuch Seebecks, eine Spannungsreihe aufzustellen, mißlang, erst Becquerel stellte eine solche Reihe auf (Ann. de Chim. et de Phys. 41, p. 353, 1829), und E. Becquerel ergänzte die Arbeit seines Vaters (ib. 8, p. 415, 1864). Da jedoch die thermoelektrischen Kräfte durch geringfügigste Strukturänderungen stark beeinflußt werden, hat diese Spannungsreihe noch weniger Wert als die Voltasche, wie Schopatschinsky zeigte (Lum. electr. 39, p. 313, 1891). Die von Seebeck festgestellte Abnahme der Stromzunahme bei steigender Differenz der Temperaturen der Lötstellen kann bis zur Umkehr des Stromes führen, wie Cumming beobachtete (Ann. of Phil. 1823, p. 497), ausführlicher W. Thomson (Phil. Trans. 1856, III, p. 698) und Tait (Proc. Edinb. 27, p. 125, 1873). Auf die Thomsonschen Erfahrungen stützt sich Avenarius und gibt eine theoretische Überlegung. An beiden Lötstellen ist eine elektromotorische Kraft E bzw. E_1 als Funktion der Temperatur tätig. Ist

$$E = a + b\,t + c\,t^2 \quad \text{und} \quad E_1 = a + b\,t_1 + c\,t_1^2\,,$$

so gibt die Strommessung

$$E - E_1 = b\,(t - t_1) + c\,(t^2 - t_1^2) = (t - t_1)\,[b + c\,(t + t_1)]\,.$$

Der Wert 0 ist von Seebeck bei $t = t_1$ festgestellt, bei $t + t_1 = - b/c$ bei Cumming, Thomson usw. (Pogg. Ann. 119, p. 406, 1863, und 122, p. 193, 1864). Die Avenariussche Formel ist bestätigt von F. Kohlrausch und Ammann für mehrere Elemente (ib. 141, p. 456, 1870). Abweichungen von der parabolischen Bahn der Avenariusschen Formel sind von Tait (l. c.) und L. Weber (Wied. Ann. 23, p. 447, 1884) festgestellt; im allgemeinen aber hat sich bestätigt, daß für die Thermoelemente ein neutraler Punkt für die Temperatur existiert. Die umgekehrte Aufgabe, aus der gemessenen elektromotorischen Kraft die Temperatur zu bestimmen, führt nach Holborn und W. Wien zu einer Gleichung dritten Grades

$$t = a\,e + b\,e^2 + c\,e^3\;;$$

die Werte von a, b, c sind von ihnen für ein Element Pt-Platinrhodium bestimmt (ib. 47, p. 107, 1892).

Schon Seebeck hatte die Forderung aufgestellt, daß der Strom an einer Lötstelle Erwärmung liefern müsse, da die Erwärmung einer Lötstelle Strom liefere. Allein das war bis dahin nicht gelungen nachzuweisen. Erst Peltier (1785—1845) beobachtete beim Durchleiten eines Stromes durch einen aus Bi und Sb zusammengelöteten Stab, daß beim Übertritt vom Antimon zum Wismut eine bedeutende Temperaturerniedrigung, bei umgekehrter Richtung eine bedeutende Temperaturerhöhung eintrat (Ann. de Chim. et de Phys. 56, p. 371, 1834). Dove fand, daß die Stromrichtung gerade umgekehrt sein müsse wie sie in der Arbeit Peltiers angegeben ist und vermutet einen Druckfehler (Repert. I, p. 353). Um die Demonstration dieser Erscheinung (heute nennt man sie Peltiereffekt) bequem zu erreichen, stellte Peltier sein bekanntes Kreuz her durch zwei senkrecht gegeneinander in ihrer Mitte verlötete Stäbe, wobei zunächst durch zwei Schenkel ein Strom vom Sb zum Bi zur Erwärmung der Lötstelle geschickt wurde. Dann löste er die Verbindung mit dem Element und tauchte die andere Seite in zwei Quecksilbernäpfchen, die mit den Enden eines Galvanometers verbunden waren.

Die Abkühlung beim Durchgang des Stromes maß Ries mit dem umgebauten Kinnersleyschen Luftthermometer und stellte bei der Richtung Bi → Sb eine sehr erhebliche Abkühlung fest. Diese fand Lenz so stark, daß er Wasser von 0° zum Frieren und Abkühlung auf — 4,5° brachte (Pogg. Ann. 44, p. 342, 1838). Sehr genaue Messungen über die Verhältnisse im Peltierkreuz führte v. Quintus Icilius (ib. 89, p. 377, 1853) durch und fand, daß sowohl Erwärmung wie Abkühlung der Intensität des durchgeleiteten Stromes proportional sind. Da nun beim Durchgang des Stromes die Erwärmung des Leiters proportional dem Quadrat der Intensität ist (Jouleeffekt, s. unten), so ergab sich die Formel

$$W = a\,J^2 \pm b\,J\,.$$

Diese Formel wurde durch die Messungen Frankenheims (ib. 91, p. 161, 1854) bestätigt.

Die Versuche, ob auch bei Elektrolyten ein Peltiereffekt eintreten könne, welche seit Du Bois Reymond (Ber. Berlin 1856, Juli) immer wieder angestellt sind, haben kein bestimmtes Ergebnis gehabt. Da kollidieren so viele Wirkungen, daß es außerordentlich schwer ist, alle einzelnen sauber zu trennen. Die Erklärung des Peltiereffekts und der Thermoströme hat manche Hypothesen gezeitigt, vor allem die der Fortführung der Wärme durch

den Strom, welche den sogenannten Thomsoneffekt erklären sollte (Phil. Trans. 1856, III, p. 661), und von Thomson dahin erklärt wurde, daß er meint, im Cu würde die Wärme durch den +-Strom, im Eisen durch den —-Strom mitgeführt. Diese Mitführung spielt in mehreren Untersuchungen eine Rolle, besonders in den Arbeiten von Haga (Wied. Ann. 28, p. 179, 1886, und 32, p. 131, 1887, Beibl. 11, p. 593). Die Theorie von Clausius (Pogg. Ann. 90, p. 571, 1853) hat in ihrer Ausgestaltung solche Hypothesen für überflüssig erkennen lassen (s. unten).

Von Bedeutung war die technische Ausbildung der Thermoelemente als Stromquelle wegen der großen Konstanz des Stromes bei gleicher Temperatur an den beiden Lötstellen. Aus der großen Zahl der Versuche hebe ich nur folgende heraus, die eine größere Verbreitung erlangt haben. Die Säule von Marcus (Pogg. Ann. 124, p. 629, 1865) hat als positives Metall eine Legierung aus Cu, Zn, Ni und Co im Verhältnis 10 : 6 : 6 : 1, und das —-Metall aus Sb, Zn, Bi im Verhältnis 12 : 5 : 1. Die Metalle sind dachartig mit der zu erwärmenden Lötstelle im First geordnet. Die Säule von Noë hat als +-Metall Sb + Zn im Verhältnis 63,5 : 36,5, als — Neusilber; die Metalle sind radial um eine Glimmerplatte geordnet, unter welche der mehrfache Bunsenbrenner gestellt wird; die Neusilberdrähte sind mit dem einen Ende an das äußere Ende eines +-Stückes gelötet, mit dem anderen an das innere des benachbarten +-Metalls (Pogg. Ann., Erg. 8, p. 579, 1878). Mure und Clamond haben ebenfalls radiale Anordnung in mehreren Schichten übereinander aus Bleiglanz und Eisen (C. R. 68, p. 1255, 1869). Durch große Verbreitung sind die Säulen von Gülcher begünstigt. Die +-Metalle sind Nickelröhren, die —-Antimonlegierung nebeneinander geordnet, so daß jede zu erwärmende Lötstelle durch eine kleine Flamme aus einer gelochten Gasleitungsröhre geheizt wird (Elektrot. Ztg. 13, p. 187, 1890).

Das Ohmsche Gesetz.

Die Leitfähigkeit der Metalle für den galvanischen Strom war schon in den Ritterschen Versuchen (s. oben) verschieden groß gefunden, aber von einer Messung konnte bei Froschschenkelversuchen nicht die Rede sein. Auch die verschiedene Fähigkeit, durch den Strom glühend zu werden, war schon von Ritter beobachtet, aber ebenfalls nicht zu einer Messung ausgearbeitet. Davy setzte nun voraus, daß die Schnelligkeit der Erwärmung sich umgekehrt ver-

halte wie die Leitfähigkeit, und bestimmte daher die Leitfähigkeit der Metalle durch die Zeitmessung bis zur Erwärmung auf einen bestimmten Temperaturgrad. So konnte er eine Reihe der Leitfähigkeit von dem besten zum schlechtesten Leiter aufstellen: Ag, Cu, Pb, Au, Zn, Sn, Pt, Pd, Fe (Gilb. Ann. 71, p. 259, 1822).

G. S. Ohm (1787—1854) benutzte das Galvanometer, wobei er zunächst noch voraussetzte, daß die Ablenkung der Stromstärke proportional sei. Als Stromquelle benutzte er ein Voltasches Element, dessen Pole mit zwei Quecksilbernäpfen verbunden waren, A und B; von A ging eine kurze Leitung zum Galvanometer, von da zu einem Näpfchen C, zwischen B und C schaltete er die zu untersuchenden Leiter ein (Schweigg. Journ. 44, p. 110, 1825). Zunächst schloß er BC durch einen sehr dicken Kupferdraht von $^1/_3{}'$ Länge und bezeichnete die dabei beobachtete Ablenkung als „Normalkraft". Er maß nun den mittleren Kraftverlust v bei Einschaltung verschiedener Drahtlängen. Er glaubt, seine Beobachtungen durch die Formel $v = m \log \left(1 + \frac{x}{a}\right)$, wo m eine Funktion der Normalkraft, der Dicke des Leiters und der elektrischen Spannung, a die Länge der festen Leitung, x die der veränderlichen sein sollte, ausdrücken zu können. Er findet bei Vergleichung verschiedener Drähte folgende Reihe: Cu, Au, Ag, Zn, Messing, Fe, Pt, Sn, Pb (l. c., p. 246), und zwar Cu 10,5 mal so gut wie Pb. Seine inkonstante Kette machte ihm Hindernisse; er fand, daß die „elektrische Kraft" zuerst sehr schnell abnimmt, aber nach Öffnen sich wieder herstellt; so beobachtet er nur den ersten Ausschlag.

Gleichzeitig mit Ohm hatte Barlow mit einer ganz primitiven Methode die Leitungsfähigkeit untersucht und dabei das Resultat gefunden, daß Leitungsdrähte einer Substanz den gleichen Leitungswert haben, wenn sich ihre Längen wie die Querschnitte verhalten (Phil. Mag. 1825, p. 105). Das gleiche Resultat fand auch Becquerel (Bull. d. Sc. 1825, p. 296). Barlow hatte noch ein anderes Gesetz gefunden; indem er an einem 838′ langen Leitungsdraht eine Magnetnadel verschob, stellte er fest, daß die Ablenkung überall dieselbe war (Schweigg. Journ. 44, p. 367, 1825). Ohm bestätigte diese Resultate durch sorgfältige Versuche (ib. 46, p. 142, 1826) und kritisierte die Methode und die übrigen unrichtigen Resultate jener beiden Forscher. Daß Ohms Stellung des Silbers falsch war, ist offenbar durch Unreinheit des Ag veranlaßt; denn auch bei Wiederholung der Versuche fand er den verkehrten Wert. Der Barlowsche Satz ist von Fechner genau untersucht und auch

auf die Leitung im Element ausgedehnt (Maßbestimmungen 1831, p. 27), von R. Kohlrausch auch für Flüssigkeitsleiter nachgewiesen (Pogg. Ann. 97, p. 401, 1856) und von G. Wiedemann bestätigt (Galvanismus, 1861).

Auf Poggendorffs Rat nahm Ohm nun als Stromquelle Thermoelemente aus Bi und Cu mit den konstanten Temperaturdifferenzen 100° und 0°, so vermeidet er das „Wogen" der elektromotorischen Kraft und erkennt, daß seine erste Formel nicht richtig ist. Er findet nun die Stärke der „magnetischen Wirkung" des Stromes

$$X = \frac{a}{b + x};$$

wo x die Länge des eingeschalteten Drahtes, a und b Konstante sind, die von der erregenden Kraft und dem Leitungswiderstand der festen Bestandteile der Anordnung abhängen. Zunächst bestätigt er das schon von Davy (l. c., p. 250) gefundene Gesetz, daß die Leitfähigkeit der Metalle durch Temperaturerhöhung geschwächt wird. Dann untersucht er die Verhältnisse, wenn er statt eines Elementes m Elemente einschaltet. Statt a ist dann $m \cdot a$ die erregende Kraft, aber wenn b der Widerstand in einem Element ist, wird jetzt der Widerstand $m \cdot b$. Ist x klein gegen b (bei Voltaelementen), so würde in dem Ausdruck $X = \frac{ma}{mb + x}$ eine Verstärkung der Wirkung am besten erzielt durch Verkleinerung des b. Das erreicht er durch Nebeneinanderschaltung der Elemente; dann ist also $X = \frac{a}{\frac{b}{m} + x}$; ist x aber groß gegen mb, so gibt der Wert $\frac{ma}{mb + x}$ nahezu die $m$fache Wirkung (Schweigg. Journ. 46, p. 160, 1826).

Nun untersucht Ohm auch die Wirkung des Multiplikators; ist die Stromintensität eines Elementes direkt geschlossen $= a/b$, so ist sie, wenn der Multiplikator von m Windungen mit je l Widerstand eingeschaltet wird $= a/(b + m\,l)$. Jede Windung wirkt mit gleicher Kraft auf die Nadel, also die Gesamtwirkung

$$= m \cdot a/(b + m\,l).$$

Das Verhältnis beider Schaltungen also $= b\,m/(b + m\,l)$. Eine Verstärkung ist also nur möglich, wenn $m\,l < (m - 1)\,b$.

Ohm dehnt seine Untersuchungen aus auf den Fall, daß mehrere (n) Erregungsstellen in der Leitung vorhanden sind, von gleicher

Stärke a und gleichen zwischen je zweien liegenden Widerständen b, sei der Widerstand der äußeren Leitung y (reduzierte Länge nennt es Ohm), so daß der Gesamtwiderstand $w = (n - 1)\, b + y$ ist. Daraus leitet Ohm die Spannung an irgendeiner Stelle des geschlossenen Stromkreises ab (Pogg. Ann. 4, p. 97; 6, p. 459; 7, p. 45, 1826) und bestätigt seine theoretischen Überlegungen durch experimentelle Prüfung mit Elektroskop und Kondensator an der Schließung eines aus 12 Voltabechern bestehenden Stromkreises (ib., p. 117). Die Zusammenfassung dieser Untersuchungen liefert Ohm in seinem Werke: Die galvanische Kette, 1827. Hier führt er den Ausdruck „Gefälle" ein und versteht darunter die Spannungsdifferenz an zwei um die Länge 1 voneinander entfernten Punkten. Für ein und denselben Leiter ist dies Gefälle überall dasselbe, für verschiedene ist es proportional den Widerständen. Da jeder Widerstand auf eine Drahtlänge vom Querschnitt 1 reduziert werden kann, spricht er von reduzierten Längen für Widerstand, bisweilen läßt er das Wort reduziert weg. Bezeichnet a die Spannungsdifferenz an der Erregungsstelle, die elektromotorische Kraft, l die reduzierte Länge der ganzen Stromleitung, so ist an zwei um die Länge λ verschiedenen Punkten die Spannungsdifferenz $= a \cdot \lambda / l$. Bezeichnet U die „Dichtigkeit" der Elektrizität an einer Stelle, k den reziproken Wert des Widerstandes von der Länge 1 und dem Querschnitt 1, q den Querschnitt des Leiters und N die Richtung des Stromes, so fließt in der Zeit 1 durch den Querschnitt eine Elektrizitätsmenge

$$e = k \cdot q \cdot \frac{\partial U}{\partial N};$$

$\frac{\partial U}{\partial N}$ ist aber das Gefälle, also gleich a/l, also $e = k\, q \cdot a/l$, oder, wenn man $e/k\, q = w$ setzt, $e = a/w$. Dies e ist nichts anderes als die Intensität, daher

$$i = a/w\,.$$

In dieser Ohmschen Arbeit ist aber in der theoretischen Begründung des Gefälles und der Berücksichtigung des Verlustes von freier Elektrizität, die er am Elektroskop maß, noch der Anfang der erst sehr viel später einsetzenden Untersuchungen der Elektrizitätsverluste bei blanken und bei isolierten Telegraphenleitungen enthalten. Man braucht nur statt Spannung an den einzelnen Stellen das Potential der Oberflächenschicht auf das Innere des Leiters zu lesen, so gehen die Ohmschen Rechnungen ohne weiteres über in die Überlegungen, welche in den Arbeiten von Wheat-

stone (Phil. Mag. 10, p. 56, 1855), Kirchhoff (Ber. Berlin 1877, p. 588), Mascart (C. R. 86, p. 965, 1878) usw. gegeben sind, auf die ich nicht näher eingehen kann. Das Ohmsche Gesetz hat selbst eine gewaltige Literatur hervorgerufen, die bis in die Gegenwart reicht; auch hier kann ich nur einzelne Hauptpunkte herausheben. Bei dieser fundamentalen Bedeutung des Gesetzes ist es um so schmerzlicher, daß der Dank des Vaterlandes Ohm erst zwei Jahre vor seinem Tode erreichte; erst im Alter von 68 Jahren wurde er gewürdigt, eine Professur an einer Universität, es war München, zu erhalten, 1852!

Zunächst bestätigte Fechner das Gesetz in einer Reihe sorgfältiger Untersuchungen, die in seinen „Maßbestimmungen über die galvanische Kette“ (1831) zusammengefaßt sind. Dabei wandte Fechner zum ersten Male die Methode der Schwingungen der Magnetnadel an. Ist die Schwingungsdauer der Nadel unter alleiniger Wirkung des Erdmagnetismus $= N$, unter gleichzeitiger Wirkung eines Stromes, dessen Ebene durch den Mittelpunkt der Nadel senkrecht zum Meridian geht, $= N_1$, so ist die gesuchte Intensität

$$J = \frac{N^2 - N_1^2}{N^2 \cdot N_1^2},$$

so bestätigte er die schon von Ritter gegebene Beziehung

$$J = \frac{E}{R + lc},$$

wo R der Widerstand der Stromquelle und der festen Leitung, l die Länge des untersuchten Drahtes und c eine Konstante war. Änderte er nicht den Leitungsdraht, sondern die Distanz der Elektroden im Element, so war zu dem R bei allen verschiedenen Versuchen ein konstantes w zu addieren; so meinte er, den „Übergangswiderstand“ nachgewiesen zu haben (Schweigg. Journ. 58, p. 403, 1830). Ohm widerlegte diese Meinung (ib. 59, p. 385, 1830, und 60, p. 32), indem er dies w durch die Polarisation, „Gegenspannung“, im Element erklärte.

Die Bestätigung des Ohmschen Gesetzes durch Pouillet (C. R. 4, p. 267, 1837), der bereits ein konstantes Element benutzen konnte, machte das Ohmsche Gesetz erst in England und Frankreich bekannt, veranlaßte aber die Franzosen, Pouillet als Erfinder auszugeben.

Von großer Bedeutung waren die Untersuchungen von R. Kohlrausch mit Spannungsmessungen durch das Elektrometer, woraus er erstens schloß, daß die elektromotorische Kraft eines Elementes

der an den Polen elektroskopisch gemessenen Spannung proportional ist, und zweitens, daß die Gefälle bei Drähten verschiedenen Materials proportional sind den spezifischen Widerständen und umgekehrt dem Querschnitt derselben. Kohlrausch schließt seine Arbeit mit den Worten: „Man sieht, das ganze Gebäude ist auf die Annahme basiert, daß der Strom in einer wirklichen Fortbewegung der Elektrizität von Querschnitt zu Querschnitt in der Kette besteht. Ein inniger Zusammenhang zwischen dem Strome und der Verteilung der elektroskopischen Elektrizität durch die ganze Ausdehnung der Kette ist schon deswegen vorhanden, weil beide in gleicher Weise von den reduzierten Längen abhängig sind, und dieser Zusammenhang, welcher auf Tatsachen beruht, bleibt bestehen, auch wenn man das Wesen des Stromes nicht mehr in der wirklichen Fortbewegung der Elektrizität erblickt" (Pogg. Ann. 75, p. 220, 1848, und 78, p. 1, 1849).

Daß auch für schlechte Leiter das Ohmsche Gesetz gültig ist, hat Gaugain mit einem Ladungselektroskop nachgewiesen (Ann. de Chim. et de Phys. 59, p. 5, 1860) und ähnliche Versuche stellten J. J. Thomson und Newall an, mit gleichem Erfolge (Proc. R. S. 42, p. 410, 1887). Daß das Ohmsche Gesetz auch für flüssige Leiter gilt, wenn man die Polarisation berücksichtigt, hatte schon Ohm bewiesen, ja Ritter hatte es schon beobachtet. Daß auch bei glühenden Gasen das Ohmsche Gesetz gilt, wenn die Polarisations- und Thermoströme bestimmt oder kompensiert sind, die in der Flamme wirken, habe ich nachgewiesen (Wied. Ann. 2, p. 83, 1877). Die scheinbaren Abweichungen von dem Gesetz sind Anzeichen für das Vorhandensein anderer Ursachen der Stromerregung.

Induktion.

Daß durch einen Strom in weichem Eisen oder Stahl Magnetismus induziert wird, war, wie oben bemerkt, von Arago entdeckt. Wunderbarerweise ist diese Entdeckung erst sehr spät praktisch verwertet worden. Soviel ich sehe, sind die ersten Elektromagnete, und zwar Hufeisenmagnete, von Brewster konstruiert (Edinb. Journ. 6, p. 210, 1826). Noch 1830 schrieb Pfaff eine Abhandlung über die Konstruktion von Elektromagneten in Hufeisenform (Schweigg. Journ. 58, p. 273, 1830). Doch interessierte damals wesentlich die Tragkraft. Lenz stellte fest, daß die Anziehung zwischen einem Anker und dem Elektromagneten dem Quadrat der Intensität des Stromes proportional sei, solange das magne-

tische Moment sich noch nicht dem Maximum nähert (Pogg. Ann. 47, p. 401, 1839). Daß für Stahlmagnete ein solches Maximum existiere, war ja schon Gilbert bekannt; Joule bestimmte das auch für Elektromagnete (Phil. Mag. 1839, II, p. 310). Die weitere Entwicklung hat wesentlich technisches Interesse, so daß wir hier sie übergehen können.

Arago machte im November 1824 eine neue Entdeckung, die den Ausgangspunkt bildet zu dem großen Gebiet der Induktionsforschung. Er sah: Erstens, daß eine schwingende Magnetnadel viel eher zur Ruhe kam, wenn sie über einer Metallscheibe, als wenn sie über einem Nichtleiter sich befand; zweitens, daß eine Magnetnadel aus der Ruhelage abgelenkt wurde, wenn oberhalb oder unterhalb derselben eine Metallscheibe rotierte. Er faßte beides zusammen unter dem Namen Rotationsmagnetismus (Ann. de Chim. et de Phys. 27, p. 363, 1824). Er wie auch die nächsten Wiederholer dieser Versuche glaubten die Erscheinung mit der von Coulomb 1812 aufgestellten Ansicht, daß alle Körper ein bestimmtes Verhältnis zum Magnetismus hätten, erklären zu können; danach sollte der Pol der Nadel in dem gegenüberliegenden Punkt der Scheibe einen entgegengesetzten Pol induzieren. In bezug auf die ebenfalls untersuchten Eisenscheiben war das richtig; aber es zeigte sich bald, daß diese Erklärung nicht möglich war.

Besonders sorgfältig war die Untersuchung Seebecks, der eine große Reihe von Versuchen mit Platten von Marmor bis Eisen anstellte, um zu zählen, nach wieviel Schwingungen eine Nadel bei gleichem ersten Ausschlag zur Ruhe komme. Das veranlaßte ihn, die „Dämpfung“ bei Bussolen einzuführen, und zwar schlug er als Material eine Legierung von Kupfer und Nickel vor. Er redet freilich auch von induziertem Magnetismus, allein da er, wie oben bemerkt, den Strom als eine magnetische Erscheinung auffaßte, bedeutete dieser Ausdruck einen Strom; das geht deutlich daraus hervor, daß er ausdrücklich sagt, daß jene vorgeschlagene Legierung durch Verteilung, d. h. Induktion, nicht magnetisch werde (Pogg. Ann. 7, p. 203, spez. 215, 1826).

Arago selbst zeigte, daß nicht induzierter Magnetismus in Frage komme, indem er die Nadel an einem Wagebalken aufhing; wurde nun die unterliegende Scheibe in Rotation versetzt, so ging der Wagebalken in die Höhe; es war also nicht Anziehung, wie bei Magnetinduktion hätte vorhanden sein müssen, sondern Abstoßung. Er untersucht die vertikale, radiale und tangentiale Komponente der Wirkung, ohne auf die induzierten Ströme zu kommen (Ann.

de Chim. et de Phys. 32, p. 213, 1826). Prevost und Colladon stellten fest, daß eine zwischengeschobene ruhende Metallscheibe die Rotation schwäche, eine Eisenscheibe sie ganz aufhebe, und daß die Intensität der Dämpfung der Dicke der Scheibe proportional sei (Bull. univ. 29, p. 316, 1825).

Christie (1784—1865) fand, daß die Wirkung proportional dem Quadrat des magnetischen Moments der Nadel sei, und daß bogenförmig eingeschnittene Scheiben, bei denen nur vier senkrecht aufeinanderstehende Radien ungespalten waren, sehr viel schwächere Rotation der Nadel bedingten (Phil. Trans. 1826, p. 219 und 1827, I, p. 71). Herschel und Babbage machten radiale Einschnitte mit gleichem Erfolg (ib., p. 481, 1825); sie zeigten auch das inverse Experiment, daß ein rotierender Elektromagnet eine Kupferscheibe mitziehe! Pohl brachte durch eine rotierende Kupferscheibe einen Ampèreschen beweglichen Bügel zur Ablenkung (Pogg. Ann. 8, p. 395, 1826), Ampère selbst eine durchflossene Drahtspirale (ib., p. 518).

Die Untersuchung dieser Erscheinung schien auf einem toten Punkte angekommen zu sein, da nahm Faraday die Sache wieder auf. Zwischen den Polen eines kräftigen Hufeisenmagneten läßt er eine Kupferscheibe rotieren, senkrecht zur Ebene des Magneten. Achse und Rand der Scheibe werden mit einem Galvanometer verbunden. Der entstehende Strom wächst mit der Rotationsgeschwindigkeit und der Stärke des Magnetfeldes (Exp. res. I, § 81, 1831). Die Richtung ändert sich beim Polwechsel oder bei umgekehrter Rotation. Daß man es hier nur mit Strominduktion zu tun hat, zeigt er durch folgenden Versuch. Am Rande des frei drehbaren Rades bringt er in einem Punkte ein Übergewicht an; dadurch wird es zu einem Pendel. Zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten kommt das schwingende Pendel sofort zur Ruhe; nähert man zwei gleiche Pole von beiden Seiten, ist keine Dämpfung zu merken. Nimmt man aber eine Eisenscheibe, so ist im ersten Falle die Dämpfung gering, weil das Eisen die Elektrizität schlecht leitet, dagegen im zweiten Falle sehr stark, weil die beiden gleichen Pole in dem gegenüberliegenden Stück der Scheibe den entgegengesetzten Pol induzieren. Aber nicht nur bei relativer Bewegung zwischen Leiter und Magnet entsteht ein solcher Induktionsstrom, sondern auch durch entstehenden und verschwindenden Magnetismus. Faraday umwickelt einen Eisenring an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen mit Drahtspulen, durch die eine schickt er einen Strom, die andere verbindet er mit dem Galvanometer. Bei Stromschluß und Stromöffnung zeigt das Galvanometer entgegengesetzte Ströme

an. Den Strom der ersten Spule nennt er den primären oder den induzierenden, den der zweiten den magnetoelektrischen.

Nobili ändert den Versuch so ab, daß er den Anker eines Hufeisenmagneten mit einer Drahtspule umwickelt, die mit dem Galvanoskop verbunden ist; beim Abreißen und Anlegen des Ankers zeigen sich die Ströme (Pogg. Ann. 24, p. 461, 1832). Auch durch Funkenentstehung weist Faraday bei dem Anker die Entstehung der Ströme nach (l. c. II, 12. Jan. 1832). Diesen Versuch reklamierte Henry (1797—1878) für sich (Sill. Journ., July 1832), aber mit Unrecht. Nun machte Faraday auch das Experiment mit dem Einschieben und Herausziehen eines Magneten in eine Drahtspule, zeigt die Addition und Subtraktion der Ströme in doppelt gewickelten oder zwei getrennten Spulen (l. c. II, p. 202ff., 1832), wendet sich dann wieder zu dem Aragoschen Versuch, wo er an astatischen Nadeln den Beweis für die Strominduktion liefert, und gibt die Regel für die Richtung des induzierten Stromes im Anschluß an Ampères oben erwähnte Stromregel. An Stelle dieser hat später Fleming die „Dreifingerregel" vorgeschlagen (Electric. 14, p. 396, 1884) und Weiler hat eine noch kompliziertere für die Induktion aufgestellt (Ztschr. f. phys. Unterr. 7, p. 133, 1894). Alle Fälle der Induktion faßt die von Lenz gegebene Regel zusammen (Pogg. Ann. 31, p. 483, 1834), die am kürzesten so auszusprechen ist, daß der induzierte Strom stets den zu seiner Erzeugung ausgeführten Akt zu hemmen sucht, nach Anleitung der erweiterten Ampèreschen Regel.

Mit Hilfe dieser Faradayschen Untersuchungen hat Nobili (1784—1835) dann für die Aragosche Scheibe die Strömungskurven konstruiert und auch experimentell bestätigt, so daß von dem der Nadel parallelen Durchmesser symmetrisch auf beiden Hälften Ströme verlaufen, die sich in dem Durchmesser gleichgerichtet vereinen (Pogg. Ann. 27, p. 426, 1833) und Faraday hat damit dann die von Arago beobachteten Komponenten senkrecht zur Scheibe und in Richtung des Radius abgeleitet (l. c., II, § 125).

Ausführlicher ist diese Frage später von Matteucci (1811 bis 1868) behandelt (Ann. de Chim. et de Phys. 49, p. 129, 1857) und nachgewiesen, daß die Strömungskurven in einer Scheibe sehr viel komplizierter verlaufen können, daß z. B. für den einfachen Aragoschen Fall vier Stromzweige vorhanden sind, aber nach Lage und Stärke der Magnetpole sehr verschieden verlaufende Kurven vorkommen. Indessen ist die theoretische Ableitung der Strömungskurven aus den isoelektrischen Kurven bei Matteucci

nicht zutreffend. Richtig und durch verschiedene Versuche bewährt ist die Berechnung Jochmanns (1833—1871), wenigstens für nicht zu schnelle Rotation, so daß die Induktion der Ströme auf die Scheibe vernachlässigt werden kann (Crelles Journ. 63, p. 1, 1863).

Ähnliche Induktionserscheinungen an schwingenden Kupferkugeln bzw. ruhender Kupferkugel mit schwingenden Magneten sind von Riecke (1845—1915; Gött. Nachr. 1876) und Himstedt (Wied. Ann. 11, p. 832, 1880) behandelt. Daß statt der Aragoschen Scheibe auch Kugeln oder Zylinder zwischen den Polen des Magneten rotieren können, ist selbstverständlich, aber sowohl von Faraday wie von Henry (l. c.) ausdrücklich bestätigt; die dabei auftretenden Induktionsströme haben genau den gleichen Grund, wie die in der Scheibe. Daß diese Strominduktion auch Wärmewirkung hat, ist ebenso selbstverständlich, aber von Foucault experimentell nachgewiesen (C. R. 41, p. 450, 1855) und von Poggendorff richtig erklärt (Pogg. Ann. 96, p. 624, 1855). Daß aber die Franzosen nun von Foucaultschen Strömen sprechen (z. B. Janet in Ann. de l'Enseignement sup. 4, p. 1, 1892) ist unmotiviert. — Für die Abhängigkeit der Stromstärke von der Rotationsgeschwindigkeit hat schon Snow Harris (1792—1867) das Gesetz abgeleitet, daß der Sinus des Ablenkungswinkels der Nadel proportional ist der Rotationsgeschwindigkeit (Phil. Trans. 1831, I, p. 76). Dasselbe hat sich für mäßige Geschwindigkeiten bis zu Ablenkungen von etwa 50° auch bewährt.

Wichtiger und für die Entwicklung der Forschung besonders wertvoll war noch der Nachweis Faradays (l. c. II, § 148, 1832), daß der Erdmagnetismus die gleichen Induktionserscheinungen hervorrufe. Er drehte eine Drahtrolle, deren Achse in der Richtung der Inklinationsnadel lag, um 180° rechts oder links herum und fand am Galvanoskop die Induktionsströme in entgegengesetzter Richtung. Natürlich wurde die Wirkung wesentlich verstärkt durch einen eingeschobenen Eisenkern. Er zeigte dann, daß auch die Einschiebung eines solchen Eisenkerns in die ruhende Drahtrolle schon genüge, um Induktionserscheinungen zu zeitigen. Endlich benutzte er auch die Horizontal- und Vertikalkomponente einzeln. Die Fortbildung dieser Untersuchungen durch W. Weber besprechen wir unten. Aber schon hier sei darauf hingewiesen, daß diese Faradaysche Entdeckung der Ausgangspunkt für die bedeutendste Erfindung auf dem Gebiet der Strommaschinen war, dem des Dynamoprinzips durch Werner Siemens 1867, welches durch Magnus

der Berliner Akademie vorgelegt wurde (Ber. Berlin 1867, p. 55) am 17. Jan. 1867. Daß die Ansprüche Wheatstones an dieser Erfindung gänzlich unbegründet sind, geht schon daraus hervor, daß er mit denselben erst hervortrat, nachdem er die von William Siemens der Roy. Soc. eingereichte Abhandlung über die Erfindung seines Bruders gelesen hatte (Proc. R. S. 1867). Zudem waren seine angefügten Bemerkungen nicht zutreffend. Die Dynamomaschine war tatsächlich schon 1866 von Werner Siemens gebaut (Ges. Abhandl., p. 491).

Die Intensität der Induktion ist zuerst gründlich untersucht von Lenz (1804–1865); er stellte fest, daß sie proportional der Anzahl der Windungen ist, unabhängig von der Weite der Windungen, daß sie aber, weil durch jede weitere Windung ein Widerstand hinzukommt, einem Maximum zustrebt. Dies Maximum der Windungszahl ist

$$n = d\sqrt{\frac{r}{a \cdot \pi \cdot k}};$$

wo d die Dicke des Drahtes, r der äußere Widerstand, a die Länge des umwickelten Teiles des Eisenkerns und k der spezifische Widerstand des Materials ist (Pogg. Ann. 34, p. 385, 1835). Dann zeigte Lenz in Verbindung mit Jacobi (1801—1874), daß die Stärke des induzierten Stromes proportional ist dem erzeugten oder verschwindenden Magnetismus (ib. 47, p. 225, 1839).

Neben dieser aus Aragos Versuch hervorgegangenen Entdeckung der Magnetinduktion hat Faraday aber auch die Induktion durch einen galvanischen Strom gefunden, und zwar, da er überzeugt war, daß es sich bei dem Aragoschen Versuch auch nur um Ströme handeln könne, hat er diese zuerst gemacht (l. c. I, § 54, 24. Nov. 1831). Auf eine hölzerne Walze wickelte er nebeneinander zwei isolierte Drahtspulen; die eine schloß er an eine galvanische Kette, die andere an ein Galvanometer. Beim Schließen des Stromes zeigte die zweite Spule einen Strom in entgegengesetzter Richtung, beim Öffnen einen gleichgerichteten. Während des Stromschlusses war kein Strom in der zweiten Spule vorhanden. Er zeigt den zweiten Strom auch durch Zersetzung des Jodkaliumkleisters an, was später bei den Telegraphenschreibern wieder angewendet wurde (1842). Dann fand Faraday auch die Induktion in einer Spule, die einer stromdurchflossenen genähert oder von ihr entfernt wurde. Diese Induktion durch den galvanischen Strom nannte Faraday Voltainduktion.

Die den Lenzschen Gesetzen über Magnetinduktion ent-

sprechenden Gesetze für die Voltainduktion haben Felici (1819 bis 1902, Ann. de Chim. et de Phys. 34, p. 64, 1851) und Gaugain (1811 bis 1880, C. R. 39, p. 909, u. 1023, 1854) gegeben.

Im Jahre 1834 machte Jenkin (On the influence by induction, 1834 u. Pogg. Ann. 35, p. 413, 1835) die Entdeckung, daß der Öffnungsfunke eines Kreises wesentlich verstärkt wird, wenn man die Leitung länger macht, wo man doch durch den größeren Widerstand eine Stromschwächung erzeugt hat; besonders groß wird diese Verstärkung, wenn der verlängerte Draht in Form einer Drahtspule eingeschaltet wird. In letzterem Falle erhält man auch eine starke physiologische Wirkung, wenn man an den Enden der Spirale zwei Handhaben anbringt. Letzteres untersuchte besonders Masson (1806—1860, Ann. de Chim. et de Phys. 66, p. 1, 1837) und schaltete in den Stromkreis ein Zahnrad ein, an dessen Zähnen eine schleifende Feder den Strom abwechselnd öffnet und schließt. Die Erklärung blieben beide schuldig. Faraday schaltete zwischen den Zuleitungsdrähten zu der Stromspirale eine kurze Drahtleitung (Nebenschluß) mit einem Galvanoskop ein und ordnet einen Quecksilberbecher zwischen der Abzweigung des Galvanoskopdrahtes von dem Schließungsdraht und dem Pol des Elementes an, so daß er den primären Stromkreis leicht unterbrechen kann. Solange der Primärstrom geschlossen ist, geht der Strom durch die Spirale und die Galvanoskopbrücke in gleicher Richtung. Wird der Strom bei dem Quecksilbernapf unterbrochen, so entsteht in der Spirale ein Induktionsstrom in gleichem Sinne wie der primäre Strom, der dann durch die Brücke im entgegengesetzten Sinne läuft. Diesen Strom weist Faraday nach, indem er die Ablenkung der Nadel im Galvanoskop beim Schließen des Stromes durch einen vorgelegten Stift verhindert. Auf analoge Weise zeigt er das Vorhandensein eines Schließungsstromes. Dazu läßt er die Nadel zunächst zum Maximum ausschlagen und verhindert die Rückkehr auf den Nullpunkt durch ein vorgelegtes Stiftchen. Schließt er nun zum zweiten Male, so kann der primäre Strom nicht mehr wirken auf die Nadel, da sie schon zum Maximum abgelenkt ist. Aber der nun in der Spirale induzierte Schließungsstrom läuft in der Spirale dem primären Strome entgegen, in der Brücke also in gleicher Richtung wie der primäre Strom und lenkt daher die Nadel noch über die markierte Ablenkung weiter ab (l. c. 9, p. 1079, 1835). Beide Ströme nennt er Extraströme. Jacobi schlug den Namen „Nebenströme“ dafür vor (Pogg. Ann. 45, p. 134, 1838). Damit war die Selbstinduktion entdeckt.

Faraday meinte, durch Entladung einer Batterie sei eine Induktion von Extraströmen nicht möglich, weil Schließungs- und Öffnungsstrom zusammenfielen. Allein es gelang Rieß, durch eine eigenartige Schaltung auch für Batterieentladungen durch eine Spirale die Extraströme nachzuweisen, deren Stärke er der Intensität des Hauptstroms proportional findet (Pogg. Ann. 47, p. 65, 1839). Diesen Satz hat für alle Extraströme erst Edlund (1819—1888) nachgewiesen in einer Arbeit, wo er auch den Nachweis erbringen will, daß Schließungs- und Öffnungsstrom stets gleich groß sind (Pogg. Ann. 77, p. 161, 1849). Aus seinen Versuchen hatte Marianini (1790—1866) geschlossen, daß der Öffnungsstrom den primären Strom überdauerte und auch der Schließungsstrom über den Augenblick der Schließung hinaus wirksam sei (Ann. de Chim. et de Phys. 11, p. 395, 1844). Aber die Versuche von Helmholtz sprechen dagegen (Pogg. Ann. 83, p. 533, 1851).

Daß die Induktionsströme selbst wieder Induktionsströme erzeugen können, ist selbstverständlich; daß sie vorhanden sind, hat zuerst Henry (1797—1878) mit Bandspiralen bis zur fünften Ordnung nachgewiesen (Phil. Mag. 18, p. 481, 1839). Die Richtung dieser Schließungs- und Öffnungsströme beobachtete er am Galvanometer oder durch Magnetisierung. Die Unvollständigkeit des Schemas von Henry wurde von Abria ergänzt, und Schwierigkeiten, welche Henry gehindert hatten (Pogg. Ann. 54, p. 84, 1841), wurden aufgeklärt, indem bei den höheren Ordnungen das Entstehen und das Verschwinden des Stromes der vorherigen Ordnung berücksichtigt werden muß (Ann. de Chim. et de Phys. 7, p. 486, 1843). Genauer sind diese Induktionsströme höherer Ordnung von Buff (1805 bis 1878) untersucht (Pogg. Ann. 134, p. 481, 1868) und dabei die Wechsel der Stromrichtungen richtiggestellt.

Die Untersuchungen von Dove (1803—1859) über den zeitlichen Verlauf der Induktion (Pogg. Ann. 43, p. 518, 1838; 49, p. 72, 1840; 54, p. 333, 1841) hatten den Erfolg, daß in Induktionsröhren mit Eisenkernen eine Verzögerung merkbar wurde für die physiologischen Wirkungen, und zwar war diese Verzögerung stärker, wenn er einen massiven Eisenkern nahm, schwächer bei einem Eisendrahtbündel. Seitdem sind in Induktionsapparaten die Eisenbündel eingeführt, zuerst von Du Bois Reymond in seinem Schlittenapparat 1848.

Für die Induktionsmaschinen, die zunächst ohne Kommutatoren konstruiert waren (Dal Negro, Phil. Mag. 1, p. 45, 1832; Pixii, Ann. de Chim. et de Phys. 50, p. 322, 1832) und daher mit ihrem

Wechselstrom wesentlich zu physiologischen Zwecken gebraucht wurden, war es wichtig, um auch zur Stromabgabe für andere Zwecke brauchbar zu sein, Gleichrichter anzubringen. Clarke war der erste, welcher an seiner Maschine dies einrichtete (Pogg. Ann. 39, p. 404, 1836). Doch erst die auf der Achse des rotierenden Ankers der Saxtonschen Maschine von Poggendorff angebrachte Form des Kommutators (ib. 45, p. 391, 1838) hat sich für lange Zeit erhalten.

Für die mit Extraströmen arbeitenden Induktionsapparate war Stromunterbrechung notwendig; das konnte Masson mit seinem Rade (s. oben) machen; man konnte aber auch das von Barlow (Bibl. univ. 20, p. 627, 1823) konstruierte Rad benutzen, welches aus einem sternförmig ausgeschnittenen Rade bestand, dessen Spitzen in einen Trog mit Quecksilber beim Rotieren tauchten; die Achse des Rades und das Quecksilber lagen im Stromschluß; die Rotation des Rades wurde durch einen in geeignete Lage gebrachten Hufeisenmagneten erzeugt. Bequemer arbeitet der Wagnersche Hammer, der sich bis heute mit Ehren behauptet hat (Pogg. Ann. 46, p. 107, 1839) und der alsbald an den Induktionsapparaten angebracht wurde, auch mancherlei „Verbesserungen" erfahren hat, im Prinzip aber nicht geändert ist. Statt des Kontaktes der Platinspitze mit Platinplatte ist der Quecksilberkontakt von Page eingeführt (Am. Journ. of sc. 35, 1839).

Unipolare Induktion.

Eine letzte Entdeckung auf dem Gebiete der Induktion von Faraday war die unipolare Induktion (l. c. II, § 217, 1832). Nach seiner Anschauung von der Induktion mußte ein Pol durch die Ebene eines Stromkreises treten, um den Strom zu erzeugen. Folglich mußte es genügen, die Achse des Magneten und die Mittelebene durch eine äußere Schließung zu verbinden und den Magneten rotieren zu lassen, dann mußte Strom erzeugt werden. Das zeigte sich in der Tat, und zwar war die Stromrichtung in dem Magneten vom Pol zur Mittelebene, wenn der rechts herum rotierende Pol ein Nordpol war. Eine eingehende Begründung dieser Erscheinung lieferte erst W. Weber (Res. aus d. Beobacht. des magnet. Vereins 1839, p. 63). Er brachte einen horizontalen Stabmagneten durch Räderwerk in bestimmte zählbare Rotation; in der Mitte des Magneten tauchte ein Radkreuz in ein Quecksilbergefäß; von da und von der Achse des Magneten führten Drähte zum Galvanometer.

Mit dieser Apparatur stellte Weber fest: 1. Die Induktion ist auf allen Wegen von einem berührten Punkte des Mantels zu dem berührten Ende der Achse gleich groß, wenn der Magnetismus gleichmäßig verteilt ist. 2. Die Induktion ist unter dieser Bedingung gleich groß, ob der Strom auf einem oder mehreren Wegen von der Oberfläche zur Achse geht. 3. Sie ist daher unabhängig von der Länge des Zylinders bei gleichmäßiger Magnetisierung. 4. Sie ist dem Querschnitt des Zylinders proportional. Diese Gesetze sind durch alle späteren Versuche bestätigt. Aber Weber äußert bereits hier, daß die Vorstellung Ampères über die Konstitution der Magnete aus Molekularströmen mit der Theorie nicht übereinzustimmen scheine. Auf die theoretischen Beziehungen zum Induktionsgesetz von F. E. Neumann usw. komme ich weiter unten.

Nun baute Plücker (1801—1868) seinen bekannten unipolaren Induktionsapparat, wo zwei Stabmagnete in einer Scheibe, gleich gerichtet, der Achse der Scheibe parallel befestigt sind; die Achse der Scheibe wird in schnelle Rotation versetzt und durch schleifende Federn kann der Strom vom Endpunkt der Achse und dem Rande der Scheibe abgenommen werden (Pogg. Ann. 87, p. 353, 1852). Plücker wollte nun diese unipolare Induktion benutzen, um die elektrische Ladung der Erde zu erklären; danach sollte am Pol die +-Elektrizität angesammelt werden, am Äquator die negative. Diese Idee wurde von Edlund wieder aufgegriffen, um damit in seiner Preisschrift (Sur l'origine de l'électr. atmosph., 1884) die atmosphärische Elektrizität zu erklären. Daß diese Erklärung unhaltbar sei, ist von mir (Wied. Ann. 28, p. 478, 1886; 29, p. 544; 32, p. 297, 1887) und Budde (ib. 30, p. 388, 1887) nachgewiesen. Ich ersetzte den Plückerschen Apparat durch einen Elektromagneten, der nicht nur erheblich stärkeres Magnetfeld lieferte, sondern auch durch seine Konstruktion weitgehendste Änderung der Versuchsbedingungen zuließ.

Die strittige Frage lief schließlich darauf hinaus, ob das magnetische Kraftfeld mit dem Magneten rotiert oder dauernd in Ruhe bleibt. Schon Faraday hatte diese Frage aufgeworfen, aber nicht definitiv beantwortet. Er sagt: Das den Magneten umgebende Kräftesystem braucht man sich nicht mit dem Magneten rotierend zu denken. Man kann sich sogar in gewissen Fällen denken, daß der Magnet zwischen seinen eigenen Kräften rotiere (l. c., § 3090, 1851). Faraday hat diese Ansicht aber nicht als unabänderlich angesehen; denn er sagt in demselben Jahre auch: Ich habe allen Grund, zu glauben, daß diese Linien (Kraftlinien) in der Erde, der

sie ihre Entstehung verdanken und aus der sie sich erheben, festgehalten werden (Proc. of the roy. Inst., 11. 4. 1851). Edlund (l. c.) und Lecher (Wied. Ann. 54, p. 179, 1895) nahmen an, daß das Kraftfeld ruhe und der Magnet rotiere, ohne das Kraftfeld irgendwie zu beeinflussen; dann sollte auf seiner Oberfläche statische Ladung vorhanden sein. Daß mit Galvanometerbeobachtungen diese Frage nicht entschieden werden konnte, ist selbstverständlich. Die Elektrometerversuche haben stets negatives Resultat gegeben, selbst wenn die Empfindlichkeit des Elektrometers ausreichte, um viel schwächere Kräfte zu messen (Mitt. d. Math. Ges. i. Hamburg 4, p. 117 u. 171, 1903/04). Die Frage nach dem ruhenden oder mitbewegten Äther hat mit dieser Frage nichts zu tun; denn es handelt sich bei der Mitführung der Kraftlinie nicht um eine Mitführung des Äthers, sondern um eine Zustandsänderung in der Lage der Kraftlinie.

Theorie der Elektrizität und des Magnetismus.

Die theoretischen Überlegungen im Gebiet der Elektrizitätslehre erfuhren eine große Umstellung durch die Einführung des Potentialbegriffs durch Poisson (1781—1840). Er geht aus von der Annahme zweier elektrischer Fluida. Sind beide gleichmäßig in einem Körper vorhanden, so nennt er das den natürlichen Zustand; ist derselbe in einem Körper gestört, so nennt man ihn elektrisiert. Dann stellt er den Unterschied von Leitern und Isolatoren auf; in ersteren können sich die Flüssigkeiten frei bewegen, in letzteren nicht; daher muß sich über den natürlichen Zustand hinausgehende Elektrizität einer Art auf der Oberfläche ansammeln. Da es sich dann bei der Wirkung eines geladenen Körpers auf einen anderen um Anziehung oder Abstoßung handelt, kann man die bereits von Euler, Lagrange und Laplace abgeleiteten Sätze über das Potential (Kräftefunktion) anwenden (Mém. de l'Inst. 1811, I, p. 1, und II, p. 163). Er wendet hier zunächst die Eulersche Gleichung $\Delta V = 0$ an. Die Bezeichnung Δ ist jedoch erst von Murphy eingeführt (Elementary princ. of the theories of electr., 1833, I, p. 140). Nun merkt Poisson, daß, wenn der Punkt (x, y, z) in der wirkenden Masse selbst liegt, der Ausdruck für $\Delta V = \frac{0}{0}$ wird; er fragt sich, welchen Wert er wirklich hat. Er schließt den Punkt durch eine umschließende Kugel von der übrigen Masse aus, also zerlegt er ΔV in $\Delta U + \Delta U_1$. ΔU_1 ist 0, weil (x, y, z) außerhalb liegt. U berechnet er direkt und findet $\Delta U = -4\pi\varrho$, wo ϱ die

Dichtigkeit in der um (x, y, z) liegenden Kugel bedeutet. Dieser zu manchen Bedenken Anlaß gebende Beweis ist von vielen Nachfolgern übernommen (Nouv. Bull. de la soc. phil. 3, p. 388, 1813).

Poisson wandte sich 1824 der magnetischen Anziehung zu und berechnet die magnetische Intensität an einem Punkte durch den Einheitspol gegeben. In dieser Arbeit beweist er $\Delta V = -4\pi\varrho$ mit Hilfe der ersten vier Sätze von Gauss' Theoria attrac. (Comm. Soc. v. Göttingen, II, 1813), ohne Gauss zu zitieren. Endlich gibt Poisson einen dritten Beweis für den Satz mit Hilfe der Laplaceschen Kugelfunktionen (Conn. des Tems. pour 1829, ersch. 1826, p. 354). In der zweiten Arbeit (Mém. Paris 6, p. 455, 1823/24) gibt Poisson auch das Gesetz des induzierten Magnetismus, wenn J das magnetische Moment für die Volumeinheit, F der Vektor der magnetischen Intensität, p eine Konstante für das der Induktion unterworfene Material bezeichnet, so spricht sich sein Gesetz in moderner Schreibweise so aus

$$\frac{4\pi \cdot J}{3} = p \cdot F\,.$$

Die Kritik an dieser Formel und die Ableitung gibt Betti. Durch Poisson ist in der ersten Arbeit die Methode der reziproken Radien, die gelegentlich freilich schon bei Euler vorkommt, ausgebildet, welche besonders von W. Thomson in seinen Potentialuntersuchungen benutzt ist.

Die Poissonschen Arbeiten führten Green (1793—1841) zur Untersuchung der Elektrizitätstheorie (An Essay on the Application of mech. Anal. to the theories of Electr. and Magn., 1828). Das Werk blieb sogar in England fast völlig unbekannt, bis W. Thomson es wieder ausgrub und von neuem in Crelles Journal, 1850—1854, veröffentlichte (39, p. 73; 44, p. 356; 47, p. 161). Zunächst zeigt Green, daß V im Innern der Körper der Gleichung genügt: $\delta V = 0$, er schreibt für Δ das Zeichen δ und nennt V die Potentialfunktion; dann leitet er ebenfalls im Anschluß an Poisson seinen berühmten funktionstheoretischen Satz ab, in der Form:

$$\iiint dx \cdot dy \cdot dz\, U \cdot \delta V + \int d\sigma \cdot U \left(\frac{dV}{dw}\right)$$
$$= \iiint dx \cdot dy \cdot dz\, V \cdot \delta U + \int d\sigma\, V \cdot \left(\frac{dU}{dw}\right)\,.$$

Dann sucht er eine Gleichung zwischen der Dichtigkeit der Elektrizität auf der Oberfläche des Körpers ϱ und der Potentialfunktion im Inneren des Körpers und außerhalb. Er findet, daß beim

Durchgang durch die Oberfläche das ΔV den Wert $-4\pi\varrho$ bekommt. Im sechsten Artikel (Crelles Journ. 44, p. 370) behandelt Green dann zwei Punkte p und p_1, deren Koordinaten reziprok sind und von denen p_1 im Innern des Körpers mit der Oberfläche A, p außerhalb desselben liegt. In p sei die Elektrizitätsmenge Q, welche auf A influenziert. Dann ist das Potential von A auf den Punkt p_1 genau so groß wie das auf p, wenn die Elektrizitätsmenge Q nicht in p, sondern in p_1 läge. Unter den mit Hilfe dieser Sätze behandelten Aufgaben ist die erste die Erklärung der Kleistschen Flaschen, dann die Kaskadenbatterie usw. Später hat sich Green wesentlich mit der Theorie des Lichtes im Sinne Cauchys beschäftigt, und so kam es wohl, daß erst durch Thomson seine fundamentalen Untersuchungen über Elektrizität und Magnetismus bekannt wurden.

Unabhängig von Green und auf anderem Wege kam G. F. Gauss zur Behandlung dieser Frage. Gauss hat zunächst die verschiedenartigen, meist unvergleichbaren Maßeinheiten für magnetische Messungen beseitigt durch Einführung des absoluten Maßsystems. Als Einheit der Zeit nimmt er die Sekunde, als Einheit der Länge das Millimeter, als Einheit der Masse das Milligramm. Dann ist die Einheit des Magnetismus diejenige, welche auf eine gleich große Menge des gleichen Magnetismus in der Entfernung 1 eine abstoßende Kraft ausübt, die gleich der Wirkung der beschleunigenden Kraft 1 auf die Masse 1 ist. Nun zeigt er, daß die auf die einzelnen Teile einer magnetischen Masse wirkenden parallelen magnetischen Kräfte sich ersetzen lassen durch zwei parallele Kräfte, die an den Polen angreifen. Solche parallelen Kräfte sind die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus $= H$. Bezeichnet M das magnetische Moment des Magneten in bezug auf seine Hauptachse, so bestimmt Gauss das Produkt HM durch Schwingungsbeobachtungen. Durch Ablenkungsbeobachtungen desselben Magneten auf eine Nadel mit dem Moment μ ergibt sich der Quotient M/H. So ist also das Moment eines Magneten sowohl wie auch die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus absolut gemessen (Intensitas vis magn. terrestr., Comm. Göttingen 1832). Die zur Ausführung solcher Messungen bequemen Apparate konstruierte W. Weber in den Resultaten des von Gauss, Weber und A. v. Humboldt gegründeten magnetischen Vereins (1836, p. 1). Um die Schwingungsdauer mit Dämpfung richtig zu bestimmen, führt Gauss das logarithmische Dekrement ein (ib. 1837, p. 58). Die vollständige Theorie der Dämpfung ist von Du Bois Reymond (Ber. Berlin 1869, p. 807; 1870, p. 537), die Theorie aperiodischer Instrumente ist von Riecke gegeben

(Wied. Ann. 51, p. 156, 1894). Bei den Magnetometern wurde dann von Gauss zuerst die Bifilarsuspension angewandt (Result. 1836, p. 71, und 1837, p .6).

Nun folgt die berühmte Arbeit von Gauss, worin er das Potential einführt (Allgemeine Sätze usw., Resultat. 1839, p. 1). Er geht von der allgemeinen Gravitation aus, betont jedoch sofort, daß sich die gleichen Betrachtungen auch auf Elektrizität und Magnetismus erstrecken. Die Funktion $V = \sum \frac{m}{r}$ nennt er das Potential der Massen m auf die Masse 1 in den zugehörigen Entfernungen r. Für solche Kräfte, die nicht im umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Entfernungen wirken, gibt es auch ein Potential, wenn es eine Funktion gibt, deren partielle Differentialquotienten die Komponenten der erzeugten Kraft darstellen. Flächen, auf denen V konstant ist, nennt er Gleichgewichtsflächen. Er leitet geometrisch zunächst einen Ausdruck für $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$ ab, ebenso für die y- und z-Achse, addiert und findet

$$\Delta V = \int \frac{d\varrho}{dr} \cdot \frac{dt}{r^2} - \int \frac{\varrho \cos \delta}{r^2} ds = M - N ,$$

wo δ der Winkel zwischen r und der Oberflächennormale in ds ist. Das dreifache Integral M verwandelt er wie im vierten Satze der Theoria attractionis in ein Oberflächenintegral. Dann ist für einen Punkt in der wirkenden Masse $M = - 4 \pi \varrho + N$; für einen außerhalb liegenden ist $M = N$, also für das Innere ist $\Delta V = - 4 \pi \varrho$, für einen äußeren Punkt ist $\Delta V = 0$. Für einen Punkt auf der Oberfläche hatte Poisson $\Delta V = - 2 \pi \varrho$ angegeben. Gauss zeigt, daß die Ableitung nicht richtig ist. In Satz 22 gibt Gauss dann das Theorem für den Fall, daß Kanten und Ecken vorhanden sind, während er es zuerst für Kugeln abgeleitet hatte. Ein strenger Beweis für $\Delta V = - 4 \pi \varrho$ ist von Riemann (1826—1866) gegeben (Schwere, Elektr. u. Magn. 1876, p. 36—46). Von Riemann stammt auch die Definition: Das Potential ist die Arbeit, welche bei Übertragung der Punkte aus unendlicher Entfernung in die wirkliche Lage geleistet wird (l. c., p. 158).

Vollständig und mit Berücksichtigung der speziellen Fälle ist das Theorem von Somoff behandelt (Theoret. Mechanik, deutsch 1879, II, p. 141 u. 230, Anm.). Danach ist

$$\Delta V = - 4 \pi \varrho \cdot \varepsilon ;$$

für einen Punkt im Innern ist $\varepsilon = 1$, im Äußern $= 0$, auf der Oberfläche ist $0 \leqq \varepsilon \leqq 1$.

Die Gaussssche Theorie des Potentials wandte F. E. Neumann (1798—1895) auf die Theorie der Induktion an (Abh. Berlin 1845, p. 1, und 1847, p. 1). Die Hauptresultate sprechen sich so aus:

1. Die in einem geschlossenen Leiter durch Bewegung des Magnetpoles induzierte elektromotrische Kraft ist proportional dem Magnetismus des Poles und der Differenz der Potentiale des letzteren in bezug auf den Leiter am Anfang und Ende der Bewegung.

2. Die in einem bewegten Leiter durch einen geschlossenen Strom 1 induzierte elektromotorische Kraft E ist gleich dem mit der Induktionskonstanten ε multiplizierten Potential derselben auf den Umfang des von dem bewegten Leiter in seiner Anfangs- und Endlage und den Bahnen seiner Endpunkte begrenzten Kurvenvierecks, wenn letzteres von einem Strom 1 durchflossen gedacht wird.

3. Die bei einer Veränderung der Intensität des induzierenden Stromes oder der relativen Lage und Gestalt des induzierenden oder induzierten Stromkreises in letzterem induzierte elektromotorische Kraft ist also ganz allgemein gleich der mit der Konstanten ε multiplizierten Differenz der Potentiale beider Kreise aufeinander in ihrem Anfangs- und ihrem Endzustande, wenn der eine von einem Strom i_1 und i_0, der andere vom Strom 1 durchströmt gedacht wird.

Daß diese Induktionsgesetze mit dem Energieprinzip übereinstimmen, hat Helmholtz (1821—1894) gezeigt (Die Erhaltung der Kraft, 1847, p. 67). Für einen geschlossenen Leiter leitet Neumann ferner den Satz ab: Der aus einer drehenden Bewegung entstehende Differentialstrom ist immer $= 0$. In der zweiten Abhandlung stellt Neumann an die Spitze den Satz: Wird ein geschlossenes, unverzweigtes, leitendes Bogensystem A' durch eine beliebige Veränderung seiner Elemente, aber ohne Aufhebung der leitenden Verbindung, in ein anderes von neuer Form und Lage übergeführt, und geschieht diese Veränderung von A' in A'' unter dem Einfluß eines elektrischen Stromsystems B', welches gleichzeitig durch eine beliebige Verrückung seiner Elemente eine Veränderung in den Zustand B'' erfährt, so ist die Summe der elektromotorischen Kräfte, welche in dem leitenden Bogensystem durch diese Veränderungen induziert worden sind, gleich dem mit der Induktionskonstante ε multiplizierten Unterschied der Potentialwerte des Stromes $B_{,,}$ in bezug auf $A_{,,}$ und des Stromes $B_{,}$ in bezug auf $A_{,}$, wenn $A_{,}$ und $A_{,,}$ vom Strom 1 durchströmt gedacht werden.

Inzwischen waren von W. Weber Apparate und Meßmethoden erfunden, die gestatteten, besser als bisher die Zulässigkeit der theoretischen Anschauungen zu prüfen. Zunächst ersetzt Weber

(Resultate 1840, p. 91) in der Tangentenbussole die Nadel durch eine bifilar aufgehängte Drahtrolle, durch welche sowohl derselbe Strom wie durch den ablenkenden Kreisbogen, oder auch ein anderer geschickt werden kann. Ist S die umflossene Fläche, D die Direktionskraft, G die absolut gemessene Intensität des Stromes, T die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus und φ der Ablenkungswinkel, so ist

$$S \cdot T \cdot G = D \cdot \operatorname{tang} \varphi \ .$$

So ist G absolut zu messen; er vergleicht sofort dies Maß mit dem elektrochemischen und findet, daß der Strom 1 in einer Sekunde 0,009376 mg Wasser zersetzt. Spätere Versuche von Casselmann, Bunsen, Joule usw. haben etwas niedrigere Werte gegeben. Die überaus sorgfältigen Verusche von F. und W. Kohlrausch haben das Resultat 0,009327 ergeben (Wied. Ann. 27, p. 1, 1886). Mit einem solchen Instrument hat Weber schon 1834 gemessen; die weiteren Verbesserungen sind 1837, das vollständige Dynamometer 1841 konstruiert (Abh. b. Begründung der Ges. d. W. in Leipzig 1846, p. 24).

Dann konstruiert Weber das Induktionsinklinatorium. Ein aus 16 Windungen bestehender Kupferring, in dessen Mittelpunkt eine Bussole aufgestellt ist, wird um eine horizontale, im magnetischen Meridian liegende Achse um 180° von $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ bis $+\frac{\pi}{2}$ gedreht. Die induzierende Komponente des Erdmagnetismus ist die vertikale $= T'$. Ist M das magnetische Moment der Nadel, w der Widerstand, r der Radius des Kupferringes, n die Anzahl der Umdrehungen, so ist die ablenkende Kraft $= \frac{2 n \pi^3 r}{w} \cdot M \cdot T_1$; die Direktionskraft der Bussole ist $M \cdot T$, also die der Ablenkung r ist $\operatorname{tang} r = \frac{2 n \pi^3 r}{w} \frac{M \cdot T'}{M T}$. Da $T' / T = \operatorname{tang} i$ (Inklination) ist, also $\operatorname{tang} r = a \cdot \operatorname{tang} i$ (Resultate 1837, p. 81). Dies Instrument führt zum Rotationsinduktor (Res. 1838, p. 102), wobei er die wichtige Entdeckung macht, daß die Stromintensität nicht direkt proportional der Umdrehungsgeschwindigkeit ist. Die Abweichung von der Proportionalität erklärt sich Weber durch den Zeitverlust bei der Ummagnetisierung des Eisenkerns. Bei einer Stöhrerschen Maschine findet Weber die Intensität $i = a n / (1 + b n + c n^2)$, wenn a, b, c Konstante und n die Anzahl der Stromwechsel sind (Pogg. Ann. 61, p. 431, 1844). Bei Gelegenheit dieser Messungen hatte Weber auch Stromverzweigungen untersucht und Poggen-

dorff mitgeteilt, darunter auch eine, die der Wheatstoneschen Brücke entspricht, und die Stromintensitäten in den fünf Drähten bei beliebiger Schaltung berechnet. Diese Mitteilung wurde von Poggendorff erst 2 Jahre später in einer Arbeit Poggendorffs benutzt (Pogg. Ann. 67, p. 273, 1846). Wheatstone gebrauchte nicht die Nullmethode für die Brücke, sondern ein Differentialgalvanometer (ib. 62, p. 535, 1844).

Die Gesetze der Stromverzweigung wurden von Neumanns Schüler G. Kirchhoff aufgefunden. Die Resultate sind: Wird ein System von Drähten, die auf ganz beliebige Weise miteinander verbunden sind, von galvanischen Strömen durchflossen, so ist 1. wenn die Drähte 1, 2 ... n in einem Punkte zusammenstoßen, $J_1 + J_2 + \ldots + J_n = 0$, wenn J_1 usw. die Intensitäten in den betreffenden Drähten sind, welche alle positiv nach dem Berührungspunkt hin zu rechnen sind; 2. wenn die Drähte 1 ... r eine geschlossene Figur bilden, $J_1 w_1 + J_2 w_2 + \ldots + J_r w_r =$ der Summe aller elektromotorischen Kräfte, die sich auf dem Wege 1, 2, ... r befinden, wo $w_1 \ldots w_r$ die Widerstände, $J_1 \ldots J_r$ die zugehörigen Intensitäten sind, alle nach einer Richtung positiv gerechnet. Diese Sätze wendet Kirchhoff dann an auf die Wheatstonesche Kombination und begründet die Methode der Widerstandsmessung, wie sie noch heute üblich ist (Pogg. Ann. 64, p. 513, 1845).

Die theoretische Ableitung dieser Sätze setzte lineare Leiter voraus; es fragte sich, ob sie für beliebig gestaltete Leiter gelten. Die Antwort gibt Kirchhoff (ib. 75, p. 189, 1848). Ein System von Körpern, welche sich berühren und dadurch galvanische Ströme erzeugen, wird an jeder Stelle eine bestimmte Spannung u haben. Bezeichnet N die Normale auf einer Fläche, wo u konstant ist, und K die Leitungsfähigkeit, so zeigt Kirchhoff, daß $\Delta u = 0$ ist, daß, wenn keine Elektrizität von der Oberfläche in die Luft ausströmt, auf der ganzen Oberfläche $\frac{du}{dN} = 0$ ist, daß an einer Grenzfläche zweier Körper $k \frac{du}{dN} + k' \frac{du'}{dN'} = 0$ und endlich ist $u - u' = U$ die konstante Spannungsdifferenz an der Berührungsstelle. Die läßt sich nun messen, und er beweist, daß es nur eine Art der Stromverbindung gibt, die den vier Bedingungsgleichungen genügt. Diese Kirchhoffschen Sätze sind dann von Helmholtz erweitert. Er spricht z. B. den ersten so aus: Bei mehreren elektromotorischen Kräften in einem Leiterkreise ist das Potential an jedem Punkte des Kreises gleich der Summe der durch die einzelnen elektro-

motorischen Kräfte bedingten Potentiale usw. (ib. 89, p. 211 u. 353, 1853).

Von Bedeutung waren die Untersuchungen von Clausius, der zunächst das Problem der Smeatonschen Tafel (Franklinsche) behandelt, welches außer von Green (Camb. Trans. 5) auch von Murphy (Element. Princ. of the Theories of Electr., 1833, p. 70) schon untersucht war. Aber Clausius löst das Problem vollständig. Ist c der Abstand der beiden Belegungen, so entwickelt er das Potential der Belegung 1 auf sich selbst und auf die Belegung 2 nach steigenden Potenzen von c und führt dadurch die Dichtigkeitsfunktion auf ein vollständiges elliptisches Integral zweiter Gattung zurück. Dies Integral wird für einen Punkt am Rande der Belegung = 1, und es ist dann die Möglichkeit gegeben, das Potential auszurechnen (Pogg. Ann. 86, p. 161, 1852). Clausius gebraucht wie Green den Namen Potentialfunktion, will aber unterscheiden Potentialfunktion als bezogen auf die Masse 1, also $V = \sum \frac{m}{r}$ von dem Potential, welches von einem Massensystem auf ein anderes ausgeübt wird, also $V = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{k=1}^{k=m} \frac{m_i m_k}{r_{ik}}$ (l. c. 163).

Wärme und Strom.

Wie oben erwähnt, hatte Davy die Erwärmung eines Drahtes benutzt, um seinen Widerstand mit anderen zu vergleichen. Ohm und Fechner hatten in den zitierten Arbeiten angenommen, daß die entstehende Wärme direkt proportional der Intensität des Stromes sei. Joule untersuchte diese Frage, indem er ein Thermometer mit Draht umwickelte und es in Wasser steckte, so daß er die Temperaturerhöhung des Wassers maß. Wenn er auch das Wassergefäß in einen Blechkasten steckte, so war die Versuchsanordnung doch sehr primitiv und es ist bewundernswert, daß er das richtige Gesetz fand. Die Intensität des Stromes maß er mit der Tangentenbussole = J; ist t die Zeit, w der Widerstand des Drahtes und c eine Konstante, so findet er die Wärme

$$W = c \cdot J^2 \cdot w \cdot t$$

(Phil. Mag. 19, p. 260, 1841).

In sorgfältigerer Methode bestätigte E. Becquerel (1820 bis 1891) das Joulesche Resultat (Ann. de Chim. et de Phys. 9, p. 21, 1843). Ausgedehnter und unter Vermeidung von Wärmeverlusten

mißt Lenz (1804—1865) und findet, daß bei gleicher Temperaturerhöhung für verschiedene Drähte die Produkte $t \cdot J^2 \cdot w$ konstant sein müssen; das zeigt er an Platin-, Eisen-, Kupfer- und Neusilberdrähten. Er findet dabei aber, daß bei höheren Temperaturen der Leitungswiderstand der Drähte größer wird (Pogg. Ann. 61, p. 18, 1844). Auch für elektrolytische Leitung untersuchte Joule die Wärmewirkung und vermied den Wärmeverlust durch die Gasentwicklung dadurch, daß er $CuSO_4$ mit Cu-Elektroden benutzte. Er fand sein Gesetz bestätigt (l. c., p. 274). Bei der Prüfung des Gesetzes durch Poggendorff ist der Widerstand der übrigen Kette berücksichtigt und das Maximum der Wärmewirkung gefunden (Pogg. Ann. 73, p. 337, 1848). Eine Bestätigung des Jouleschen Gesetzes ist durch Zöllner ebenfalls mit ganz anderer Methode erbracht (Pogg. Ann. 109, p. 256, 1860).

Die Abhängigkeit der Leitfähigkeit der Metalle von der Temperatur ist von J. Müller (ib. 73, p. 434, 1848) genauer untersucht, aber die Metalle waren nicht rein. Zuverlässiger sind erst die Versuche von Matthiessen und v. Bose (ib. 115, p. 353, 1862) und die von ihnen benutzte Formel $\lambda_t = a + b\,t + c\,t^2$ hat sich besonders darin bewährt, daß bei allen späteren Untersuchungen sich herausgestellt hat, daß das Glied t^2 nicht fehlen darf. So hat Benoist die Formel mit Temperaturen bis 860° bestätigt (C. R. 76, p. 342, 1873). Für sehr tiefe Temperaturen hat Wroblewski bis zu — 201° nach der Formel $r_t = r_0\,(1 + \alpha\,t)$ einen Temperaturkoeffizienten zu bestimmen gesucht (Wied. Ann. 26, p. 27, 1885). Aus seinen Versuchen geht hervor, daß der Widerstand schneller abnimmt als die Temperatur. Von besonderer Bedeutung wurde diese Widerstandsänderung mit der Temperatur durch die Einführung der Bolometer durch Paalzow und Rubens (Wied. Ann. 37, p. 529, 1889).

Sehr viel komplizierter sind die Verhältnisse beim Glühen der Drähte. Nach den ganz unzureichenden Versuchen Davys (s. oben) hat J. Müller versucht, Gesetze zu finden (Fortschritte d. Phys. 1849, p. 384). Er erklärt: Verschieden lange, aber gleich dicke Drähte desselben Metalls glühen bei gleicher Intensität; verschieden dicke Drähte desselben Metalls glühen bei Stromstärken, die dem Durchmesser proportional sind. Das letztere Ergebnis ist von Zöllner bestätigt (Verhandl. Basel 2, p. 211, 1859). Ein allgemeines Gesetz ist bis zum Schlusse dieses Zeitabschnittes noch nicht gefunden (cf. Tumlirz und Krug, Berichte Wien 96, p. 1007, 1888).

In einem gewissen Zusammenhang mit den vorigen Versuchen steht die Arbeit von Wiedemann und Franz, worin gezeigt wird, daß die Leitfähigkeit für Elektrizität und für Wärme bei den Metallen sich nahezu entsprechen (Pogg. Ann. 89, p. 530, 1853); aber eine gesetzmäßige Beziehung ist auch hier nicht gegeben.

In der schon erwähnten Abhandlung von Helmholtz: Die Erhaltung der Kraft (1848) hat er bereits ausgesprochen, daß in einem Stromkreise stets die Gesamtwärme $Q = J^2 \cdot w t$ ist; kommt der Strom von n Elementen, jedes mit der elektromotorischen Kraft A, so ist $Q = J \cdot n \cdot A \cdot t$, und in Worten spricht er aus: Die gesamte Wärmemenge, welche durch den Strom erzeugt wird, muß gleich sein der durch die chemischen Zersetzungen frei werdenden Wärme und die elektromotorische Kraft eines Elements ist proportional der im Element durch die chemische Aktion entwickelten Wärmemenge. Clausius bestimmte das mechanische Äquivalent der elektrischen Entladung und die dabei eintretende Erwärmung eines Drahtes; da zeigt sich, daß die Arbeit, welche die Elektrizität bei einer Änderung ihrer Anordnung leistet, unabhängig ist von der Art dieser Änderung und nur abhängig von dem Anfangs- und Endzustande, und zwar gemessen wird durch die Zunahme des Potentials der gesamten Elektrizität auf sich selbst. Äußert sich die Arbeit als Erwärmung und mechanische Wirkung, so ist die Summe aller Wirkungen einer solchen Entladung gleich der Zunahme des Potentials (Pogg. Ann. 86, p. 337, 1852). Auch die Arbeit zur Erzeugung des Stromes unterliegt einer solchen Beziehung: „Die bei einer bestimmten Bewegung einer Elektrizitätsmenge von der im Leiter wirksamen Kraft getane Arbeit ist gleich der bei der Bewegung eintretenden Zunahme des Potentials dieser Elektrizitätsmenge und der freien Elektrizitätsmenge aufeinander.“ So ist in jedem beliebigen Stück eines Stromkreises die geleistete Arbeit $W = w \cdot J^2$ und die erzeugte Wärme $H = A \cdot w J^2$, wo A die Wärmekonstante ist (ib. 89, p. 211 und 353, 1853). Seitdem ist die Elektrizitätslehre dem Arbeitsbegriff untergeordnet; sie wurde von Clausius auch in seinen „Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie“ 1863 in das Energieprinzip eingeschlossen. Die vollständige Darstellung der innerhalb des hier zu behandelnden Zeitabschnitts gefundenen Tatsachen ist in dem 2. Bande der neuesten Auflage seiner mechanischen Wärmetheorie enthalten; ich darf daher für die weitere Entwicklung auf dies Werk verweisen.

Das Webersche Grundgesetz.

Das Dynamometer benutzte Weber, um die elektrodynamische Wirkung genauer zu prüfen. Er unterscheidet die Bifilarrolle von der Multiplikatorrolle und läßt durch die erstere nur einen Teil des Gesamtstromes gehen; daher kann er starke Ströme in der Multiplikatorrolle gebrauchen. Die Intensität des Stromes maß er in einem „Magnetometer", welches tatsächlich das erste Spiegelgalvanometer war. So stellt er fest, daß die elektrodynamische Kraft zweier Teile einer Kette dem Quadrat der Stromintensität proportional ist. Dann richtet er das Dynamometer so ein, daß die Bifilarrolle in beliebiger Entfernung von der Multiplikatorrolle nach den beiden Gaussschen Hauptlagen beobachtet werden kann und stellt fest, daß die elektrodynamische Fernwirkung den gleichen Gesetzen unterworfen ist, wie die magnetische (Abhandl. b. Begr. d. sächs. Ges., Leipzig 1846, p. 211). Dann zeigt Weber die Brauchbarkeit des Dynamometers zur Ableitung der Intensitätsgesetze und findet dabei den neuen Satz, daß die Intensität des induzierten Stromes der Geschwindigkeit der induzierenden Bewegung proportional ist. Diese Versuche sind von Felici (Nuovo Cim. 9, p. 345, 1859) und Gaugain (C. R. 39, p. 909 u. 1023, 1854) bestätigt. Weber zeigt ferner, wie sein Apparat für Wechselströme brauchbar ist und z. B. die Tonhöhe eines longitudinal schwingenden Magnetstabes, dessen einer Pol von einer Induktionsrolle umgeben ist, bestimmen läßt (l. c., p. 269 ff.).

Da das Ampèresche Grundgesetz wohl die elektrodynamischen Erscheinungen umfaßt, aber nicht die elektrostatischen und nicht die Voltainduktion, so sucht Weber nach dem allgemeinen Gesetz (l. c., p. 305). Er stellt an die Spitze drei Tatsachen: 1. Zwei geradlinige Stromelemente paralleler Richtung ziehen einander an oder stoßen einander ab, je nachdem sie von der Elektrizität in gleichem oder entgegengesetztem Sinne durchlaufen werden. 2. Zwei Stromelemente, welche in einer geraden Linie liegen, mit welcher ihre Richtung zusammenfällt, stoßen einander ab oder ziehen einander an, je nachdem sie von der Elektrizität in gleichem oder entgegengesetztem Sinne durchlaufen werden. 3. Ein Stromelement, welches mit einem Drahtelement in einer geraden Linie liegt, mit welcher die Richtungen beider Elemente zusammenfallen, induziert in dem Drahtelement einen gleichen oder entgegengesetzten Strom, je nachdem seine eigene Stromstärke abnimmt oder zunimmt. Geht

man von den beiden ersten Tatsachen aus und betrachtet den Strom als strömende +- und —-Elektrizität, so daß in dem einen Element $+e$ und $-e$, in dem zweiten $+e_1$ und $-e_1$ fließt, so würde das Coulombsche Gesetz für den Fall 2 die Resultante 0 ergeben; es müssen also die abstoßenden und anziehenden Kräfte verschieden groß sein und die elektrischen Massen wirken um so schwächer, je größer das Quadrat ihrer relativen Geschwindigkeit ist. Aus diesen Voraussetzungen ist nun als Resultante aller vier Wechselwirkungen ein Ausdruck abzuleiten, der dem Ampèreschen Fundamentalgesetz durchaus entspricht. Aber, wenn r den Abstand der beiden Stromelemente bedeutet, so ist in dem Falle 1 die relative Geschwindigkeit $\frac{dr}{dt} = 0$, also versagt hier der eben abgeleitete Ausdruck; es kann also die Kraft nicht gleich sein dem Ausdruck: $\frac{e \cdot e_1}{r^2}\left[1 - \alpha\left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right]$. Nimmt man aber an, daß die Wechselwirkung auch noch von der relativen Beschleunigung abhängt, so ist der einfachste Ausdruck für die Kraft

$$= \frac{e \cdot e_1}{r^2}\left[1 - a^2\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + b\,\frac{d^2r}{dt^2}\right].$$

Durch Vergleichung mit dem Ampèreschen Gesetz ergibt sich $b/r = 2a^2$, also wird die Kraft

$$= \frac{e \cdot e_1}{r^2}\left[1 - a^2\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + 2a^2 r\,\frac{d^2r}{dt^2}\right].$$

Das ist das Webersche Fundamentalgesetz. Zur Ableitung dieses Gesetzes hatte Weber nur die beiden ersten Tatsachen benutzt; es fragt sich, ob die dritte auch durch das Gesetz erfüllt wird. Weber zeigt, daß er die elektromotorische Kraft nach seinem Gesetz berechnet und daß die errechneten Werte mit den Beobachtungswerten übereinstimmen. Er sucht dann die Bedenken zu entkräften, die wegen des Eintritts der Beschleunigung in die Formel gelegt werden können. Von Bedeutung ist, daß er aus dem Ampèreschen Gesetz durch einfache Substitution sein Gesetz ableiten kann in der Form

$$K = \frac{e \cdot e_1}{r^2}\left[1 - \frac{a^2}{16}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \frac{a^2}{8}\,r\,\frac{d^2r}{dt^2}\right]$$

und endlich löst er die drei Fälle der Voltainduktion für die Induktion eines bewegten Stromes auf ruhende Stromleitung und einer Intensitätsschwankung im ruhenden Stromkreise auf denselben Leiter. Solange es sich um geschlossene Ströme handelt,

gibt die Webersche Formel in feststehenden Leiterkreisen die richtige elektromotorische Kraft, und alle in der Voltainduktion wirksamen Kräfte führen auf eine elektrodynamische Kraft, wie sie die Beobachtungen ergeben haben. Bei dem Vergleich seines Gesetzes mit dem Neumannschen Induktionsgesetz glaubt Weber, einen Widerspruch konstatieren zu müssen, sobald er sein Gesetz anwenden will auf ungeschlossene Stromkreise. Die gleiche Prüfung unternimmt Neumann (Abhandl. Berlin 1847, p. 48). Er glaubt, den Widerspruch mit dem Weberschen Gesetz durch eine an den Gleitstellen durch den Eintritt neuer Stromelemente bedingte Induktion erklären zu können. Weber genügt diese etwas gewaltsame Übereinstimmung nicht. Er zeigt, daß bei gehöriger Zerlegung des Vorganges kein Widerspruch heraustritt. Somit sind alle Induktionsmöglichkeiten aus dem Weberschen Gesetz ableitbar (Abhandl. Leipzig, 1, p. 310, 1852). Daraufhin konnte dann E. Schering (1839—1897) aus dem Weberschen Gesetz das Neumannsche durch Berechnung der Potentiale ableiten (Pogg. Ann. 104, p. 266, 1858).

Nun beginnen die Maßbestimmungen Webers (Abhandl. Leipzig, 1, p. 199, 1852). Jacobi hatte, um eine Vergleichbarkeit der Messungen verschiedener Forscher zu ermöglichen, einen Etalon in Form eines Kupferdrahtes von 7,61975 m Länge und 0,000667 m Durchmesser einer Reihe von Physikern 1846 übersandt. Wohl hatten sich mehrere danach ein Widerstandsmaß hergestellt, aber es stellte sich alsbald heraus, daß der Widerstand eines solchen Kupferdrahtes nicht konstant ist und sich um so schneller ändert, je häufiger er gebraucht wird. Darum unternahm es nun Weber, die drei Größen Intensität J, elektromotorische Kraft E und Widerstand W absolut zu bestimmen, indem er es anschloß an die Gausssche absolute Messung des Magnetismus. Als Stromquelle benutzte er zunächst einen magnetelektrischen Induktor, welcher gestattete, durchaus konstante, kurze Stromimpulse zu geben. Das früher von ihm erfundene Spiegelgalvanometer (s. oben) machte er dadurch empfindlicher, daß er die Drahtwicklung und den Dämpfer ellipsoidisch gestaltete.

Um mit solchen Induktionsstößen zu messen, hatte Gauss die sogenannte Zurückwerfungsmethode erfunden (Resultate Göttingen 1838, p. 98). Ein Stromstoß gibt die Elongation a, beim Zurückschwingen ist die Elongation nach der anderen Seite b, kehrt jetzt die Nadel in die Ruhelage zurück, so wird der Stromstoß in entgegengesetzter Richtung gegeben, die Nadel fliegt wieder

zurück usw. Dann ist also das log. Dekrement $\lambda = \ln \frac{a}{b}$ und die der Nadel erteilte Geschwindigkeit

$$C = \frac{\pi}{2T} \cdot \frac{a^2 + b^2}{\sqrt{ab}} \cdot e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tang} \frac{\lambda}{\pi}},$$

wenn T die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus ist. Für schwächere Stromstöße eignet sich diese Methode nicht; dafür erfand Weber nun die Multiplikationsmethode, indem er bei der ersten Rückkehr der Nadel in die Ruhelage einen entgegengesetzten Impuls gab, also den Ausschlag steigerte; das wird fortgesetzt, bis die Elongation keine Zunahme mehr erfährt; sie sei dann x, dann ist die gesuchte Geschwindigkeit

$$C = \frac{x}{2} \cdot \frac{\pi}{T} (1 - e^{-\lambda}) e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tang} \frac{\pi}{\lambda}}.$$

Dieser Geschwindigkeit ist der Integralwert der Stromintensität proportional. Da nun der Magnetismus, also auch der Erdmagnetismus, von Gauss in Millimeter, Milligramm und Sekunde gemessen war, kann auch die Elektrizität so gemessen werden.

Danach definiert Weber: 1. Die Intensität 1 hat der Strom, welcher, die Ebene 1 umschließend, dieselbe Wirkung ausübt wie der Stabmagnetismus 1. 2. Die elektromotorische Kraft 1 ist die vom Erdmagnetismus 1 auf eine geschlossene Kette ausgeübte elektromotorische Kraft, wenn die Kette so gedreht wird, daß die von ihrer Projektion auf eine gegen die Richtung des Erdmagnetismus senkrechte Ebene begrenzte Fläche in der Zeit 1 um die Fläche 1 zu- oder abnimmt. 3. Der Widerstand 1 ist der Widerstand einer solchen Kette, in welcher die Einheit der elektromotorischen Kraft einen Strom von der Intensität 1 hervorruft. Zur Ausführung dieser Messungen konstruiert Weber nun seinen Erdinduktor, welcher in einer Drahtrolle bekannter Windungszahl und Drahtlänge besteht, die um einen Durchmesser genau um 180° nach rechts oder nach links gedreht werden kann und entweder mit der Achse senkrecht in die Richtung der Horizontal- oder Vertikalkomponente gestellt werden kann. Mit einem solchen Erdinduktor hat Weber nach der Multiplikationsmethode zuerst die elektrischen Einheiten absolut gemessen (l. c., p. 252).

Weber zeigt nun, daß man auch ohne jedes magnetische Maß, rein elektrodynamisch durch Voltainduktion absolute Maße bestimmen kann. Dann definiert er die Einheit der Intensität so: Die Einheit ist die Intensität des Stromes, welcher, indem er die

Fläche 1 umläuft und auf einen gleichen Strom, der ebenfalls die Fläche 1 umläuft, aus einer großen Entfernung R wirkt, wenn die Fläche des zweiten Stromes senkrecht zu der des ersten steht und sie halbiert, auf den letzteren Strom ein Drehungsmoment ausübt, welches sich zur Einheit des Drehungsmoments wie $1 : 2\,R^3$ verhält. Dies so definierte Maß der Stromintensität verhält sich zu dem elektromagnetischen wie $1 : \sqrt{2}$, die analog definierte elektromotorische Kraft verhält sich zur elektromagnetischen wie $\sqrt{2} : 1$, also der Widerstand ist hier doppelt so groß (l. c., p. 261).

Endlich kann man eine elektrostatische Messung absolut ausführen, ausgehend von dem Coulombschen Gesetz. Dann ist die elektrische Kraft 1 auf ein elektrisches Teilchen ausgeübt, wenn sie der ponderablen Masseneinheit, an welcher das elektrische Teilchen haftet, die Einheit der Beschleunigung erteilt; die Einheit der Stromstärke ist dann vorhanden, wenn in der Zeit 1 durch den Querschnitt die Elektrizitätsmenge 1 fließt, und der Widerstand 1 ist der, bei welchem die elektrische Kraft 1 die mechanische Intensität 1 erzeugt. Weber nennt diese Messung die mechanische, weil nur mechanisch gemessen wird. Um dies dritte Maß auf die früheren zu reduzieren, benutzt Weber sein Grundgesetz in der Form $k = \frac{ee'}{r^2}\left[1 - \frac{1}{c^2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \frac{2r}{c^2}\,\frac{d^2r}{dt^2}\right]$. Da man bei der dritten Methode die relativen Geschwindigkeiten als konstant betrachten muß, fällt das dritte Glied fort und es ergibt sich, daß die mechanische Stromintensität

$$h = \frac{c}{4}\,i$$

ist, wenn i die elektrodynamische Intensität ist. Analog bestimmt sich die elektromotorische Kraft $f = \frac{4}{c}\cdot e$ und der Widerstand $v = \frac{16}{c^2}\,w$.

Es ist also notwendig, c zu bestimmen. Diese sehr mühsame Messung führte Weber in Verbindung mit R. Kohlrausch aus (l. c. 5, p. 228, 1857) und findet $c = 439450 \cdot 10^6$ mm $= 41949$ geogr. Meilen (l. c., p. 264). Mit solcher Geschwindigkeit müßten also zwei Elektrizitätsteilchen gegeneinander bewegt werden, damit die elektrodynamische Kraft die elektrostatische aufheben kann.

Schon vorher hatte Weber gezeigt, daß man mit seinem Erdinduktor am bequemsten und zuverlässigsten die Inklination bestimmen kann, indem man einmal die horizontale Komponente induzieren läßt und mit der Multiplikationsmethode den Bogen A

mißt, und dann die Vertikalkomponente den Bogen B erzeugen läßt; dann ist $\tan J = B/A$ (Abhandl. Göttingen 5, p. 53, 1853).

Im Jahre 1861 hatte nun die Roy. Soc. in London eine Kommission eingesetzt unter Führung von Thomson, welche auf Grund der Weberschen Maße einen Normalwiderstandsetalon, das Weber, festsetzen sollte. Die Kommission wählte als Einheit 10^{10} mg/sec. Weber erhielt diesen Etalon von Thomson und stellte fest, daß er 10293000 m/sec Widerstand habe (Abhandl. Göttingen 10, p. 1, 1682). In derselben Arbeit prüft Weber auch die von Werner Siemens hergestellte Quecksilbereinheit des Widerstandes (Pogg. Ann. 110, p. 1, 1860). Siemens war dazu gekommen, weil die Drähte sich so veränderlich gezeigt hatten; so wählte er das stets rein darzustellende Quecksilber und bestimmte als Einheit den Widerstand eines Quecksilberprismas von der Länge 1 m und 1 qmm Querschnitt bei 0^0. Er stellte auch fest, daß der Temperaturkoeffizient bei Hg am niedrigsten ist unter allen Metallen. Weber fand nun diesen Widerstand = 10257000 m/sec. Es würde zu weit führen, wollte ich die nun folgenden Untersuchungen Webers über die Methoden der Widerstandsbestimmung, der Empfindlichkeit der Tangentenbussole, des Differentialgalvanometers im Verhältnis zur Brückenkombination, der Stromarbeit schildern; nur sei erwähnt, daß er am Schlusse dieser Arbeiten als das nächste Ziel die Auffindung des Zusammenhanges zwischen Elektrizität, Licht und Wärme bezeichnet.

Internationale Einheiten.

Während Gauss und Weber von 1 mm, 1 mg und 1 Sekunde ausgingen bei ihrem Maßsystem, da bei physikalischen Messungen gerade diese Einheiten besonders viel gebraucht werden, hat der internationale Kongreß zu Paris 1881 mit Rücksicht auf die Technik, wo es sich um wesentlich größere Quantitäten handelt, das Zentimeter als Längeneinheit, das Gramm als Masseneinheit, die Sekunde als Zeiteinheit festgesetzt und danach die Einheiten folgendermaßen bestimmt: 1 Ohm $= 10^9$ $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$; 1 Volt $= 10^8$ $\text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2}\,\text{sec}^{-2}$; 1 Ampere $= 10^{-1}$ $\text{cm}^{1/2}\,\text{g}^{1/2}\,\text{sec}^{-1}$; 1 Coulomb $= 10^{-1}$ $\text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2}$; 1 Farad $= 10^{-9}$ $\text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^2$. Die beiden letzteren für die Quantität der Elektrizität und für die Kapazität. Es ist bedauerlich, daß persönliche und vielleicht politische Rücksichten den englischen Vorschlag, die Intensitätseinheit 1 Weber zu nennen, zu Falle brachten (Wied. Ann. 14, p. 708, 1881). Da in der Tat die

Siemenssche Einheit einwandfrei herzustellen ist unter Beachtung entsprechender Vorsichtsmaßregeln, wie sie von Jäger zusammengestellt sind (Phys.-Techn. Reichsanst. 2, p. 379, 1895), ist naturgemäß die größte Sorgfalt auf die Vergleichung dieser Einheit mit dem Ohm zu richten. Daher sind eine große Reihe von Methoden und Verbesserungen ersonnen, „das Ohm" zu bestimmen; ich nenne daraus nur die von W. Weber und Zöllner vorbereiteten, von G. Wiedemann ausgeführten Versuche (Ber. Leipzig 1880, p. 77, und Abh. Berlin 1884), die Bestimmungen von Lord Rayleigh (Phil. Trans. 1882, II, p. 661), von H. Weber (Der Rotationsinduktor, 1882, p. 76), Lorenz nach einer besonderen Methode (Wied. Ann. 25, p. 1, 1885), Himstedt (ib. 26, p. 547, 1883; 54, p. 305, 1895) und Dorn (ib. 17, p. 773, 1882; 22, p. 565, 1884; 36, p. 22 u. 398, 1889), Fr. Kohlrausch (ib. 35, p. 700, 1888). Eine Kritik der bisherigen Versuche gab Rayleigh (Phil. Trans. 21, p. 10, 1886). Endlich ist von Dorn eine Übersicht über alle Bestimmungen des Ohms mit entsprechender Kritik derselben gegeben (Über d. wahrsch. Wert des Ohms usw., 1893) und als das gesetzliche Ohm stellt sich demnach der Widerstand einer Hg-Säule von 1 qmm Querschnitt und 106,3 cm Länge dar. Schon bei dem ersten Vorschlage der S.-E. hatte Siemens darauf Bedacht genommen, praktisch brauchbare Rheostaten herzustellen. Die ersten Rheostaten besonderer Konstruktion rühren von Wheatstone her (Phil. Trans. 2, p. 309, 1843), bei welchen der Widerstandsdraht auf eine Marmorwalze gewickelt war und auf eine Messingwalze abgewickelt wurde. Zwei Jahre früher hatte Jacobi schon den Leitungsdraht auf eine spiralig eingekerbte Holzwalze fest eingelegt, so daß derselbe nur zur Hälfte über das Holz herausragte; auf dem Draht war ein Kontakt verschiebbar, während das eine Ende des Drahtes mit der Achse verbunden war (Pogg. Ann. 54, p. 340, 1841). Nach Anleitung der Jacobischen Einrichtung ist Wheatstone auf die Idee seines Rheostaten gekommen. Nimmt man wie Wheatstone Marmor oder Serpentin, so ist auf die Vorsichtsmaßregeln von Wiechert (Wied. Ann. 26, p. 336, 1885) zu achten. Siemens führte dann seinen auf die S.-E. geeichten Stöpselrheostaten ein (Pogg. Ann. 110, p. 1, 1860), während der Jacobische Rheostat das Modell für die modernen Röhrenwiderstände ist.

Graßmanns Elektrodynamik.

Nahezu gleichzeitig mit Webers erster Arbeit über sein Grundgesetz trat Graßmann (1809—1872) mit seiner neuen Theorie der Elektrodynamik hervor. Er fand das Ampèresche Gesetz

(s. oben) in einem Falle bedenklich. Betrachtet man nämlich zwei parallele Stromelemente, wo der Winkel $\varepsilon = 0$ wird, so gibt das Ampèresche Gesetz die Kraft $K = \frac{ab}{r^2}(2 - 3\cos^2\alpha)$, der Ausdruck ist 0, wenn $\cos 2\alpha = \frac{1}{3}$ wird. Denkt man sich also einen Kegel, dessen Spitze in dem anziehenden Element liegt, mit dem Winkel 2α, so daß $\cos 2\alpha = 1/3$ ist, so ist auf dieser ganzen Kegeloberfläche die Wirkung $= 0$; innerhalb des Kegels ist Abstoßung, außerhalb desselben Anziehung (Pogg. Ann. 64, p. 1, 1845). Darum geht Graßmann von einem „Winkelstrom" aus; er denkt sich die Schenkel eines Winkels von einem Strome durchflossen; aus solchen Winkelströmen läßt sich jeder geschlossene Stromkreis aufbauen. Ein lineares Stromelement läßt sich auch als solch ein Winkelstrom auffassen, nämlich so, daß die Schenkel zusammenfallen und nun von beiden Enden des Elementes Ströme in entgegengesetzter Richtung ausgehen. Dann macht er die Annahme, daß gleiche, entgegengesetzte Ströme sich aufheben. Er findet dann die Bewegung eines angezogenen Elementes senkrecht zu seiner Richtung, wenn die Anziehung von einem längeren Strome von der Stärke i ausgeht, $= \frac{i \cdot b_1}{r} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$; wo r die Entfernung des Mittelpunkts des Elementes vom Anfangspunkt der Strombahn, α den Winkel von r mit der Strombahn und b_1 die senkrechte Projektion des Elements auf die Ebene des Winkels α bedeuten. Diese Gleichung ist das Fundament der Graßmannschen Elektrodynamik. Für geschlossene Ströme führt sie auf dieselben Resultate, wie die Ampèresche. Für ungeschlossene Ströme ergeben sich Widersprüche, doch sind die etwa eine Entscheidung bringenden Versuche schwer realisierbar und bisher nicht gemacht. Bei Graßmann kommt es darauf hinaus, daß die Kraftwirkung senkrecht zu dem Element gerichtet ist, während bei Ampère die Kräfte, mit welchen die Leiterelemente aufeinander wirken, in die Richtung der Verbindungslinie der Mittelpunkte fallen. Die „mechanische" Theorie der Elektrodynamik Hankels (1814—1899) ist der Graßmannschen sehr ähnlich (Ber. Leipzig 17, 1865, 16. Mai), und in der Theorie der Elektrizität aus intermolekularen Wirkungen von Reynard (C. R. 67, p. 996, 1868) ergibt sich für die Wechselwirkung zweier Ströme eine der Graßmannschen ganz gleiche Formel. Stefan (1835—1893) hat eine Übersicht über die bis dahin bekanntgewordenen Theorien, die eine Mitwirkung des Dielektrikums ausschließen, und eine etwa noch mögliche neue Theorie gegeben,

dabei zeigt sich, daß in der Graßmannschen Theorie das Prinzip der Gleichheit von actio und reactio nicht gewahrt ist (Ber. Wien 59, II, 1869, und 79, II, p. 659, 1879).

Diamagnetismus.

Aus den Weberschen Maßbestimmungen ist noch seine Methode, den Diamagnetismus zu messen, nachzutragen. Schon Brugmans hat die Beobachtung gemacht, daß metallisches Wismut die Pole eines Magneten abstößt (Magnet. seu de affectionibus magnet. obser., 1778, p. 130). Becquerel beobachtete mit einer astatischen Nadel, wie sie Vasalli (Gilb. Ann. 3, p. 116, 1800) und v. Arnim (ib. 5, p. 382, 1800) dadurch hergestellt hatten, daß sie in einen Strohhalm oder ein Korkstück zwei gleiche Magnetnadeln mit den gleichen Polen einander zugewandt, hineinsteckten und dann an einem Kokonfaden aufhängten. Eine solche astatische Nadel hat schon Trémery (Journ. d. Min. VI, 1797) angewandt. Becquerel fand, daß Antimon ebenfalls abstoßend auf die Pole wirkte (Bull. univ. 7, p. 371, 1827). Da in neueren Büchern bisweilen Le Baillif als Entdecker genannt wird, füge ich hinzu, daß dieser Baillif allerdings in Bull. 8, p. 87, die Entdeckung sowohl der Abstoßung von Wismut und Antimon wie auch der astatischen Nadel, die er Sidéroskop nannte, für sich reklamierte. Mit welchem Recht geht daraus hervor, daß sein Sidéroskop drei Nadeln in Querstellung hatte, so daß es weder astatische war, noch auch so gebraucht werden kann, wie Becquerel seine Nadel gebrauchte. Soviel ich weiß, hat Becquerel auch gar nicht auf diese Reklamation geantwortet. Faraday machte die gleichen Beobachtungen, indem er Stäbe oder Kugeln aus diesen Metallen aufhing und den Polen eines Elektromagneten näherte; er nannte diese Körper diamagnetisch, im Gegensatz zu den von den Polen angezogenen, die er paramagnetisch nannte (Exp. res. 20 u. 25, § 2790, 1845/50) und fügte den diamagnetischen Körpern auch chromsaures Kali und andere hinzu (ib. 21, § 2376, 1876). Besonders wichtig war, daß sich ihm auch die Gase als diamagnetisch erwiesen (§ 2400), doch erst Plücker fand, daß daher auch das Medium, in welchem beobachtet wurde, berücksichtigt werden müsse; so fand er Sauerstoff in Luft magnetisch (Pogg. Ann. 73, p. 551, 1848). E. Becquerel fand bei messenden Versuchen das Gesetz: Die Anziehung oder Abstoßung eines magnetischen oder diamagnetischen Körpers durch den Magneten ändert sich beim Eintauchen in eine Flüssigkeit (Gas) um ebensoviel, wie die diamagnetische

Abstoßung oder magnetische Anziehung des verdrängten Teiles der Flüssigkeit beträgt (Ann. de Chim. et de Phys. 28, p. 281, 1850). Faraday hatte (l. c.) eine Reihe der Metalle vom stärksten diamagnetischen zum schwächsten (man muß hinzufügen: beim Versuch in Luft) aufgestellt: Bi, Sb, Zn, Sn, Cd, Hg, Pb, Ag, Cu, Au, As, U, Rh, Jr, W, und glaubte, durch die Annäherung des Magneten würde in diesen Metallen ebenso wie im Eisen eine Polarität, nur in entgegengesetztem Sinne, erzeugt. Später, als er die Bedeutung des Mediums kennen gelernt hatte, gab er diese Ansicht auf und versuchte, die Erscheinungen nach Art der elektrischen Influenz zu erklären (Pogg. Ann., Erg. 3, p. 73, 1852). Weber wies die bestehende Polarität durch ein einfaches Experiment nach, indem er zeigte, daß ein zwischen die Pole eines Hufeisenmagneten gebrachtes Stück Wismut die Wirkung der Pole nach außen verstärkt (ib. 73, p. 241, 1848). Um aber wirklich messende Versuche anstellen zu können, konstruierte er sein Diamagnetometer (Abhandl. Leipzig 1, p. 485, 1852), durch welches er die Wirkung des Wismutstabes auf die Magnetnadel ohne störenden Einfluß des Erdmagnetismus feststellen konnte, indem er die Wismutstäbe durch Stromspiralen magnetisch erregte. Die Polarität des Wismuts ist dann der des Eisens entgegengesetzt und er kann die Abstoßung genau messen. Auf diese Weise hat Tyndall ausgedehnte Messungen ausgeführt, die Webers Resultate bestätigten (Phil. Trans. 1856, I, p. 237).

Eine zweite Methode gab Weber in derselben Arbeit an (l. c., p. 506); er ließ einen diamagnetisierten Wismutstab in einer Spirale Ströme induzieren durch Hereinstecken und Herausziehen und beobachtete an einem Galvanometer die Stromstärken. Weber fragt nun, wie dieser Diamagnetismus zu erklären sei. Vier Möglichkeiten sind vorhanden. Die innere Ursache kann 1. in der Existenz zweier magnetischer Fluida gefunden werden, welche unabhängig von ihren Trägern beweglich sind; 2. in der Existenz zweier Fluida, die nur mit den Molekülen drehbar sind; 3. in der Existenz beharrlicher, von zwei elektrischen Fluidis gebildeter Molekularströme, welche mit den Molekülen drehbar sind; 4. in der Existenz zweier beweglicher elektrischer Fluida, welche in Molekularströme versetzt werden können. Fall 1 ist die Theorie von Coulomb und Poisson. Weber weist nach, daß sie unhaltbar ist; Fall 3 ist die Theorie Ampères, und Fall 2 läßt sich auf 3 zurückführen. So bleibt übrig Fall 4, d. h.: Es existieren in den Molekülen zurücklaufende Bahnen, in welchen die Elektrizität ohne Widerstand beweglich

ist; diese Molekularströme bestehen so lange, als ein Erreger da ist. Es ist also unmöglich, permanente Diamagnete herzustellen. Diese Folgerung ist experimentell bestätigt. Es folgt daraus die Faradaysche Behauptung, daß magnetische Körper sich in dem magnetischen Kraftfelde von Orten schwächerer zu solchen stärkerer Wirkung, umgekehrt diamagnetische Körper sich von Orten stärkerer zu solchen schwächerer magnetischer Wirkung begeben.

Dieser von den meisten Forschern damals gebilligten Auffassung setzte E. Becquerel (1820—1891) eine andere, die auf den Zustand des Mediums wesentlich gegründet ist, entgegen (Ann. de Chim. et de Phys. 28, p. 343, 1850). Danach sind alle Körper magnetisch, auch der leere Raum. Diamagnetismus gibt es also gar nicht, es handelt sich immer nur um ein mehr oder weniger magnetisch als der umgebende Raum; letzteres tritt bei den als diamagnetisch bezeichneten Körpern ein, so daß Bi, Sb usw. schwächer magnetisch sind als der leere Raum. Nimmt man das oben angeführte Gesetz von Becquerel dazu, so ist klar, daß durch diese Auffassung alle Erscheinungen des Diamagnetismus einwandfrei erklärt werden können. Daß den Zeitgenossen Becquerels die Annahme, daß auch der leere Raum magnetisches Moment habe, recht unwahrscheinlich erschien, ist ja verständlich. Für die Gegenwart ist es gewiß kein Hindernis. Es ist auch zu beachten, daß mit dieser Becquerelschen Auffassung die Versuche von Tumlirz über das magnetische Verhalten des Bergkristalls (Wied. Ann. 27, p. 133, 1886) leicht erklärlich erscheinen. Duhem machte auch darauf aufmerksam, daß die Annahme diamagnetischer Polarität gegen den 2. Hauptsatz der Energie verstoße (C. R. 108, p. 1642, 1889).

Zulässigkeit des Weberschen Gesetzes.

Das Webersche Gesetz verursachte eine längere Diskussion. Zunächst war Riemann (1826—1866) in seinen Vorlesungen 1861 bei den Untersuchungen über das Potential zu einem etwas anderen Ausdruck des Potentials gekommen, als es das Webersche Gesetz gibt. Aus Webers Gesetz folgt das Potential

$$V = -\frac{ee'}{r}\left[1 - \frac{1}{c^2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right];$$

das Riemannsche Potential aber lautet:

$$V = -\frac{ee'}{r}\left[1 - \frac{1}{k^2}\left\{\left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_1}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dy_1}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt} - \frac{dz_1}{dt}\right)^2\right\}\right]$$

(Schwere, Elektr. u. Magn., 1876, p. 334). Die Untersuchung stammt aus dem Jahre 1858; da hatte Riemann der Gesellschaft der Wissenschaften in Göttingen eine kurze Abhandlung überreicht, dieselbe aber zurückgezogen; sie ist nach seinem Tode veröffentlicht (Pogg. Ann. 131, p. 237, 1867). Riemann hat darin die Hypothese benutzt, daß die Kraft, welche von einem elektrischen Teilchen zur Zeit t ausgeübt wird, auf ein anderes Teilchen die Zeit $(t + d\,t)$ gebraucht. Ein Gedanke, der von Gauss ausgesprochen war in einem Briefe an Weber von 1845 (C. Neumann, Math. Ann. 1, p. 317, 1869). Helmholtz machte 1870 gegen das Webersche Gesetz den Einwand, daß es für Strömungen im Innern eines Leiters zu labilem Gleichgewicht führen könne (Ges. Abhandl. I, p. 545). Dagegen zeigte Weber, daß dieser Fall nur eintreten könne, wenn die elektrischen Teilchen sich mit einer Geschwindigkeit bewegten $> c^2$ und dann auch nur in molekularer Distanz (Abhandl. Leipzig 10, p. 170, 1871). Darauf erklärt Helmholtz 1873, daß sich aus dem Weberschen Gesetz ergebe, daß, wenn sich eine ponderable Masse μ, die teilweise mit Elektrizität geladen sei, in der Richtung der ausgeübten Kraft bewege, auf μ eine Verzögerung ausgeübt würde, umgekehrt eine Beschleunigung (Ges. Abhandl. I, p. 646). Weber zeigt, daß bei richtiger Ableitung der Gleichung für die lebendige Kraft diese Behauptung von Helmholtz nicht richtig ist (Pogg. Ann. 156, p. 1, 1875). Helmholtz glaubt endlich, noch einen Fall denken zu können, bei welchem die Geschwindigkeit imaginär werden könnte (Ges. Abhandl. I, p. 684).

In diese Kontroverse griffen noch ein: C. Neumann (1832 bis 1925) außer durch die oben erwähnte Arbeit in folgenden gegen die Helmholtzsche Beweisführung gerichteten Bemerkungen: Pogg. Ann. 155, p. 219, 1875, und Ber. Leipzig 1871, 20. Oktob., p. 386, und Zöllner (Pogg. Ann. 158, p. 482, 1876) und mehrere andere. Gegen die Grundvoraussetzung Webers, daß im Strome zwei gleiche, entgegengesetzt fließende e und e_1 sich bewegen, will Clausius ein Gesetz ableiten, welches von dieser Voraussetzung frei ist (ib. 156, p. 657, 1875, und Borch. Journ. 82, p. 85, 1876). Er geht von dem Potential $V = k \cdot \frac{e e_1}{r} \cdot v \cdot v' \cos \varepsilon$ aus, wo v und v' die Geschwindigkeiten der Elektrizitätsteilchen, ε der Winkel ihrer Richtungen und k eine Konstante bedeuten, deren Verhältnis zu dem Weberschen c durch die Beziehung gegeben ist $k = \frac{2}{c^2}$. Mit diesem Potential leitet Clausius dann auch einen Ausdruck für die Wirkung zweier Stromelemente aufeinander ab, der dem Graßmannschen

gleich wird. Gegen einzelne Angriffe verteidigte Clausius das Gesetz und leitet besonders die ponderomotorischen Wirkungen ab (Wied. Ann. 1, p. 14, 1877). Helmholtz hatte nun Rowland veranlaßt, Konvectionsversuche zu machen und deren elektromagnetische Wirkungen zu messen zur Prüfung des Weberschen Gesetzes. Helmholtz erkennt selbst an, daß die Resultate mit dem Gesetz übereinstimmen (Pogg. Ann. 108, p. 487, 1876). Die Gesetze von Weber, Clausius und Riemann sind dann von Fröhlich übersichtlich verglichen (Wied. Ann. 9, p. 261, 1880). Clausius selbst verteidigte sich gegen den Einwurf, daß seine Geschwindigkeiten absolute seien, damit, daß nach seiner Grundannahme die Wechselwirkung durch das Zwischenmedium vermittelt sei; daher seien sie auch relativ (ib. 10, p. 614, 1880). Auf die Edlundsche Äthertheorie will ich nur verweisen (Pogg. Ann. 149, p. 87, 1873, und Wied. Ann. 1, p. 161, 1877). Eine sehr eingehende Kritik aller drei Gesetze von Weber, Clausius und Riemann gibt Budde (1842—1921) und zeigt eine Reihe von Versuchen an, durch welche die Zulässigkeit geprüft werden kann (Wied. Ann. 30, p. 100, 1887).

Maxwells Theorie.

Von ganz anderen Voraussetzungen als die bisher erwähnten Theorien geht Maxwell (1831—1879) aus. Schon in seiner ersten Arbeit (Camb. Trans. 10, p. 27, 1856) zeigt er die Grundlagen seiner Anschauung. Das war die Faradaysche Vorstellung des Kraftfeldes (Exp. res., § 3269, 1852) und die Arbeit von W. Thomson über die Analogie zwischen den elektrischen Erscheinungen und den elastischen (Camb. math. Journ. 2, p. 61, 1847). Statt die einzelnen Arbeiten Maxwells zu verfolgen, genügt es, die zusammenhängende Darstellung seiner Theorie in dem 1873 erschienenen Werke (Treatise on Electr.) zu lesen; denn erst durch dies Werk wurde sie in der Welt bekannt und gewürdigt. Maxwell geht von der Elektrostatik aus, wie sie von Faraday nach dem Vorgange von Wilke gegeben war. Er definiert aber z. T. anders. Ist e die Ladung eines Körpers, f die Kraft, die in einer bestimmten Richtung auf ihn wirkt, so ist $f = e \cdot \mathfrak{E}$. Dies $\mathfrak{E}$ hängt von der Elektrizitätsverteilung in den übrigen Körpern ab; er nennt $\mathfrak{E}$ die Feldstärke; sie steht senkrecht auf der Oberfläche und ist selbst proportional der Flächendichte der Ladung. Also ist die Kraft, die auf jedes Leiterteilchen wirkt, proportional dem Quadrat der Feldstärke. Diese Kraft nennt er elektrische Spannung. Die

elektrische Polarisation eines dielektrischen Teilchens ist eine durch die Feldstärke hervorgerufene elektrische Verschiebung. Die Ladung einer Kugel ist der Fluß der nach außen gerichteten Elektrizitätsverschiebung durch eine zur Kugel konzentrische Kugelfläche. Die Energie ist in irgendeinem Punkte des Mediums in Form eines Spannungszustandes aufgespeichert. Die elektrische Verschiebung ϑ ist $\mathfrak{E} \cdot \varepsilon / 4\pi$, wo ε die Dielektrizitätskonstante ist. Die von der elektrischen Polarisation herrührende Energie in der Volumeneinheit des Dielektrikums ist gleich dem halben skalaren Produkt aus elektrischer Feldstärke und elektrischer Verschiebung. Dieser Energie an Größe gleich entspricht der Zug in Richtung der Kraftlinien und der Druck senkrecht hierzu pro Flächeneinheit. Die Ladung auf der Oberfläche eines Teilchens ist so groß, daß die Flächendichte an einem Punkte gleich der Verschiebung nach innen ist. Die elektrische Verschiebung ist dieselbe wie die Elektrizitätsbewegung durch den Querschnitt eines Leiters, nur daß im Dielektrikum die elektrische Elastizität der Verschiebung entgegenwirkt. Die Elektrizitätsbewegung folgt denselben Bedingungen wie die Bewegung einer inkompressiblen Flüssigkeit. Das sind die Grundsätze, von denen Maxwell ausgeht (§ 62). Wenn er zur Begründung dieser Sätze auch die Versuche von Cavendish heranzieht, so übersieht er, daß diese nur eine erweiterte Wiederholung der Wilkeschen sind.

Aus diesen Voraussetzungen erklärt Maxwell dann die Elektrostatik. Was man Ladung eines Leiters nannte, ist tatsächlich die Oberflächenladung des umgebenden Dielektrikums; in diesem ist die Energie in der Volumeneinheit numerisch gleich der elektrischen Spannung pro Flächeneinheit

$$= p = \frac{1}{2} \vartheta \cdot \mathfrak{E} = \frac{\varepsilon}{8\pi} \mathfrak{E}^2 = \frac{2\pi}{\varepsilon} \vartheta^2 .$$

Bei dem, was wir elektrischen Strom nennen, sucht die dauernd durch das leitende Medium fließende Elektrizität den Polarisationszustand ebenso schnell wieder herzustellen als ihn die Leitfähigkeit verschwinden läßt. Ist die Feldstärke eines Volumelements von der Seite 1 zur Seite 2 gerichtet, so ist die Oberfläche auf der Seite 1 positiv, auf der Seite 2 negativ geladen. Unter Induktion hat man das Produkt $4\pi \cdot \vartheta$ zu verstehen. Wenn das Medium nicht vollkommen isoliert, so verwandelt sich die potentielle Energie des erzwungenen Zustandes in Wärme. Die Geschwindigkeit dieser Entpolarisierung hängt von der Isolation des Mediums ab. Bei einem

Leiter hat also der Stromerzeuger dauernd Arbeit zu leisten, um die Polarisation des Mediums aufrecht zu erhalten. Die potentielle Polarisationsenergie wird dabei dauernd in Wärme verwandelt.

Analog führt Maxwell die magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$ ein, ist das Potential V, so ist $\mathfrak{H} = -$ grad V, d. h. das Potentialgefälle. Es ist demnach das Linienintegral von Punkt A zum Punkt B über eine beliebige Kurve als Differenz der Potentiale in A und B darzustellen, also $\int_A^B \mathfrak{H}\, dr = V_A - V_B$. Thomson hatte in der oben zitierten Abhandlung schon den Begriff der magnetischen Induktion eingeführt $\mathfrak{B} = \text{rot}\, \mathfrak{A}$, wo $\mathfrak{A}$ nichts anderes ist als das Vektorpotential, welches von Neumann eingeführt war. Diesen Begriff übernimmt Maxwell. Von Helmholtz hat er aus der Arbeit über Wirbelbewegung (Borch. Journ. 55, p. 25, 1858), die auch englisch erschien (Phil. Mag. 37, p. 485, 1867), übernommen, daß, wenn ein magnetisches Feld durch einen Strom erzeugt wird, dieses vergleichbar ist mit dem Fluß einer inkompressiblen Flüssigkeit, so daß der magnetische Vektor dargestellt ist durch die Geschwindigkeit der Flüssigkeit und der elektrische Strom entspricht den Wirbelfäden in der Flüssigkeit. Bezeichnet nun J den Vektor der Magnetisierung, so ist

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + J \cdot 4\pi$$

die Magnetisierungsgleichung. Bezeichnet $\mathfrak{C}$ die Stromdichte, so ist also nun

$$4\pi\,\mathfrak{C} = \text{rot}\,\mathfrak{H}$$

die Gleichung des elektrischen Stromes. Sei $\mathfrak{F}$ die Kraftdichte, q der Querschnitt des Leiters von der Länge ds, dann ist, da

$$\mathfrak{C} = \frac{i \cdot dr}{q \cdot ds}\,;\ \mathfrak{F}\, q \cdot ds = q\, ds [\mathfrak{C}\, \mathfrak{B}] \quad \text{oder} \quad \mathfrak{H} = [\mathfrak{C}\, \mathfrak{B}]$$

die Gleichung der elektromagnetischen Kraft. Sei r der Ortsvektor des Stromes und $d' r$ der Zuwachs dieses Vektors, wenn die Strombahn verschoben wird, in der Zeit dt, so mag $\mathfrak{G} = \frac{d' r}{dt}$ die Geschwindigkeit von $d r$ sein, dann ist

$$\mathfrak{E} = [\mathfrak{G}\, \mathfrak{B}] - \frac{\partial \mathfrak{A}}{\partial t} + \mathfrak{E}_3\,;$$

wo $\mathfrak{E}_3$ das elektrische Potential im Endpunkt von r bedeutet. Bei geschlossenen Strömen fällt dies $\mathfrak{E}_3$ bei der Integration aus. Diese Gleichung, als die Gleichung der elektrischen Kraft bezeichnet,

ist das Induktionsgesetz; $\mathfrak{A}$ hat die gleiche Bedeutung wie oben in $\mathfrak{B} = \text{rot}\,\mathfrak{A}$. Die Gleichung für die elektrische Verschiebung ist schon genannt, $\vartheta = \frac{\varepsilon}{4\pi} \cdot \mathfrak{E}$. Wenn nun $\mathfrak{K}$ die Dichte des Leitungsstromes, C die Leitfähigkeit der Substanz, so ist $\mathfrak{K} = C \cdot \mathfrak{E}$ die Leitungsgleichung.

Unter dem „wahren" elektrischen Strome versteht Maxwell den Strom, welcher für die elektromagnetischen Erscheinungen in Frage kommt; der ist nicht gleich dem Leitungsstrom, weil die Änderung der elektrischen Verschiebung ebenfalls wirkt; es ist also $\mathfrak{C} = \mathfrak{K} + \frac{\partial \vartheta}{\partial t}$ die Gleichung des „wahren" Stromes auch

$$= C\mathfrak{E} + \frac{\varepsilon}{4\pi} \frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t} .$$

Die Raumdichte der wahren Elektrizität ist

$$\varrho = \text{div}\, \vartheta .$$

(Die Bezeichnung „wahre" rührt von H. Hertz her.) Die Flächendichte der wahren Elektrizität ist

$$\sigma = n\,\vartheta + n'\,\vartheta' ,$$

wo n und n' die Einheitsnormalen nach beiden Seiten der Unstetigkeitsfläche bedeuten. Endlich ist die Gleichung für die induzierte Magnetisierung

$$\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H} ,$$

wo μ die Permeabilität bedeutet. Mit diesen Gleichungen kann Maxwell nun die Probleme, welche bis dahin bekannt waren, sämtlich lösen; das hatten die elektrodynamischen Theorien der anderen Forscher aber auch schon gekonnt. Es würde die elektromagnetische Theorie Maxwells wohl nicht das Aufsehen erregt haben, wie sie es wirklich hat, wenn es ihm nicht gelungen wäre, eine Frage mit ihr zu lösen, die schon lange die Denker bewegt hatte. Ich habe schon erwähnt, daß Euler Licht, Elektrizität, Magnetismus und Wärme durch Bewegungs- und Druckzustände des Äthers zu erklären versucht hatte; das war damals natürlich ergebnislos geblieben.

Elektromagnetische Lichttheorie.

Faraday hatte um eine mit Schwefelkohlenstoff gefüllte Röhre eine starke Induktionsrolle gewickelt und zeigte mit zwei Nicols, daß die Polarisationsebene gedreht wird bei Stromschluß (Exp. res. 19, 1846), und in demselben Jahre untersuchte Böttger

die Erscheinung in vielen Experimenten (Pogg. Ann. 67, p. 290 u. 350, 1846). Daß die Drehung auch durch Elektromagnete hervorgerufen werden kann, zeigte Faraday ebenfalls. Die Abhängigkeit von der Wellenlänge wurde von G. Wiedemann (ib. 82, p. 215, 1851), die Abhängigkeit von der Stärke des Magnetfeldes ist von Verdet festgestellt (Ann. de Chim. et de Phys. 41, p. 370, 1854). Die Abhängigkeit von dem cos des Winkels zwischen Lichtstrahl und Achse des Magnetfeldes ist von Cornu und Potier genauer untersucht (C. R. 102, p. 385, 1886). Unter dem Einfluß des Erdmagnetismus fand H. Becquerel ebenfalls Drehung (ib. 86, p. 1075, 1878) und Bichat und Blondlot zeigten die Drehung auch durch die Entladung einer Batterie (ib. 94, p. 1590, 1882). Perkin und Gladstone suchten eine Relation zwischen Drehung der Polarisationsebene und der Refraktion und Dispersion aufzustellen (Journ. chem. Soc. 325, p. 750, 1889). Der Einfluß der Temperatur ist zuerst untersucht von Lüdtge (Pogg. Ann. 137, p. 287, 1869).

Daß auch bei der Reflexion eines Lichtstrahls an der polierten Fläche eines Magnetpoles eine Drehung der Polarisationsebene eintritt, hat Kerr entdeckt (Phil. Mag. 3, p. 321, 1877), und zwar ist die Drehung den Molekularströmen des Magnets entgegengesetzt. Auch von den Seitenflächen des Magnets reflektiertes Licht zeigt die Drehung (ib. 5, p. 161, 1878). Eingehend für Eisen, Nickel und Kobalt ist diese Drehung von Kundt geprüft (Wied. Ann. 23, p. 239, 1884; 27, p. 191, 1886) und von Righi (N. Cimento 18, p. 54, 1885).

Zur Erklärung dieser Drehung der Polarisationsebene hatte Faraday (l. c.) angenommen, daß durch die elektromagnetische Einwirkung der in den Körpern vorhandene Äther direkt in Bewegung gesetzt wird. Dem widersprach die Unmöglichkeit, im Vakuum eine solche Erscheinung hervorzurufen, und die Beobachtung, daß die Einwirkung besonders in kristallinischen Medien eine sehr verschiedenartige ist. C. Neumann hatte in seiner Dissertation eine auf der Weberschen Theorie beruhende Erklärung gegeben mit der Annahme, daß ein Molekularstrom auf ein in der Richtung seines Radius schwingendes Ätherteilchen ebenso wirkt wie auf einen in gleicher Richtung fließenden Strom (Die magnetische Drehung des Lichtes, 1863). Das kam im wesentlichen darauf hinaus, daß der Fresnelschen Gleichung für die Schwingung des Lichtstrahls ein Glied, welches den Differentialquotienten der Geschwindigkeit nach der Zeit enthielt, hinzugefügt wurde. Allein diese Theorie war unhaltbar, als der Einfluß der Wellenlänge und der Kerreffekt entdeckt waren.

Daß Maxwell veranlaßt wurde, sich mit dieser Frage zu beschäftigen, hatte zwei besondere Veranlassungen. Als Maxwell Professor am King's College in London war, trat er in persönlichen Verkehr mit Faraday, und dieser beschäftigte sich damals (Live of Faraday 2, p. 379) intensiv mit der Frage, ob die Geschwindigkeit des Lichtes dieselbe sei wie die der Fortpflanzung der magnetischen Wirkung, und ob dieselbe beeinflußt werde von der Induktionsfähigkeit der Körper, durch welche die Wirkung vermittelt wird. Die zweite Anregung war die, daß er bekannt wurde mit der durch Weber und Kohlrausch (l. c.) ausgeführten Messung der Konstanten c des Weberschen Gesetzes und der Bemerkung Kirchhoffs (l. c.) über das Verhältnis von c zur Lichtgeschwindigkeit. So stellte Maxwell zunächst ein mechanisches Modell des elektromagnetischen Feldes her (Phil. Mag. 21, p. 161, 281, 338, 1861, und 22, p. 12 u. 85, 1862). Dabei ging er zurück auf die Arbeit von Thomson (Proc. Glasgow 3, p. 281, 1853) über den „rotatorischen" Charakter des Magnetismus; so setzte er voraus, daß in einem Magnetfelde das Mittel, dessen Schwingungen das Licht darstellen, in Rotation um die magnetische Kraftlinie ist.

Die Schwierigkeiten, welche Maxwell hierbei fand, eine vollständige Theorie zu liefern, veranlaßten ihn, eine elektrodynamische Theorie des elektromagnetischen Feldes aufzubauen (Phil. Trans. 155, p. 459, 1865), und er ergänzt diese durch die Arbeit, wo er nun als Basis für eine elektromagnetische Lichttheorie nur die beiden Gleichungen voraussetzt

$$\text{rot}\,\mathfrak{H} = 4\pi\,\mathfrak{S} \quad \text{und} \quad \text{rot}\,\mathfrak{E} = \mathfrak{B}\,,$$

wo $\mathfrak{S}$ der Gesamtstrom ist, der das Magnetfeld zu erzeugen imstande ist (Phil. Trans. 158, p. 643, 1868). Endlich gibt Maxwell in dem Treatise on Electricity von § 781 an eine Zusammenfassung der „elektromagnetischen Theorie des Lichtes", die wesentlich auf die drei Fundamentalgleichungen hinauskommt:

$$\begin{aligned} \text{I.}\quad & \text{div}\,\mathfrak{E} = 4\pi\, c^2\,\varrho\ ; \\ \text{II.}\quad & \text{rot}\,\mathfrak{H} = \dot{\mathfrak{E}}/c^2 + 4\pi\, J\ ; \\ \text{III.}\quad & \text{rot}\,\mathfrak{E} = -\,\mu\cdot\dot{\mathfrak{H}}\,. \end{aligned}$$

Wunderbarerweise hat Maxwell hier die Rechnungen aber nicht an den Feldstärken $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{H}$ durchgeführt, weil er die Induktionserscheinungen als Fernwirkungen dargestellt hat; ein Schönheitsfehler, der von seinen Nachfolgern beseitigt wurde. Nun leitet Maxwell auch die magnetische Drehung der Polarisationsebene

ab, indem er dabei das Helmholtzsche Resultat (Crelles Journ. 55, p. 1, 1858) benutzt, daß, wenn ein aus bestimmten Flüssigkeitsteilchen bestehender Wirbel sich in der Flüssigkeit verschiebt, das Produkt aus seiner Rotationsgeschwindigkeit mit seinem Querschnitt konstant bleibt (§ 820ff.).

Von den weiter gefundenen Resultaten gebe ich folgende an. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Störung im nicht leitenden Medium ist numerisch gleich der Zahl der elektrostatischen Einheiten, welche in einer elektromagnetischen Einheit enthalten sind nach Webers Maßbestimmungen. Eine den modernen Messungen entsprechende Zusammenstellung beider Größen ist von W. Wien gegeben (Enzyklop. d. mat. Wiss. 5, 3, p. 189 u. 193). Die Dielektrizitätskonstante eines durchsichtigen Mediums ist angenähert gleich dem Quadrat des Brechungsindex. Dies ist von Boltzmann (1844—1906) bei Gasen bewährt (Pogg. Ann. 155, p. 407, 1873). Die Richtung der magnetischen und auch der elektrischen Störung ist senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung, liegt also in der Wellenebene; aber beide stehen senkrecht aufeinander. In § 792 berechnet Maxwell die Strahlungsenergie; er findet, daß die innere Energie des Mediums halb elektrisch, halb magnetisch ist; wenn jede $= p$ ist, so ergibt sich in Richtung der Fortpflanzung ein Druck $2p$. Die Dichte des Energiestromes ist durch Poynting bestimmt, als Poyntingscher Vektor später bezeichnet (Phil. Trans. 1884, p. 343).

Nach diesem hier theoretisch abgeleiteten Lichtdruck haben schon viele Forscher vor Maxwell gesucht. Aus der Newtonschen Theorie leitete Homberg die Forderung eines Druckes ab und wollte ihn gefunden haben (Hist. Paris 1708, p. 21); aber Mairan zeigte, daß sein Experiment falsch sei (Traité de l'Aurore boréale, p. 370). Dann wollte Michell den Druck gezeigt haben (Priestley, Hist. of vis. 1, p. 387, 1772), aber Bennet zeigte, daß die Wärmestrahlung die Ursache gewesen sei (Phil. Trans. 1792, p. 81). Daß Euler aus theoretischen Gründen einen solchen Druck forderte, ist oben erwähnt. Auch im 19. Jahrhundert hat es nicht an Beobachtern gefehlt, welche solchen Druck nachgewiesen haben wollten. In der Crookesschen „Lichtmühle“ (Phil. Trans. 164, p. 501, 1874) sollte der Lichtdruck erwiesen sein. Eine thermodynamische Überlegung leitete Bartoli 1876 zu der Forderung, daß der Lichtstrahl einen Druck ausüben müsse. Durch einen rotierenden Spiegel übertrug er strahlende Energie von einem kalten auf einen warmen Körper. Das wäre ein Widerspruch gegen den 2. Hauptsatz, wenn

nicht durch das Licht ein Strahlungsdruck ausgeübt würde (N. Cimento 15, p. 193, 1889). Ebenfalls von thermodynamischen Überlegungen ging Boltzmann aus, fand aber nicht den Strahlungsdruck, sondern das Strahlungsgesetz, daß nämlich die Intensität der Emission strahlender Energie durch einen Körper von der Temperatur T proportional ist der vierten Potenz der absoluten Temperatur (Wied. Ann. 22, p. 31, 1884), nachdem dies Gesetz bereits fünf Jahre früher von Stefan experimentell gefunden war (Ber. Wien 79, p. 391, 1879). Den wahren Lichtdruck fand erst Lebedew (Archives d. Sc. 8, p. 184, 1899).

Um auch die Doppelbrechung behandeln zu können, macht Maxwell die Annahme, daß die Dielektrizitätskonstante in kristallinischen Medien nach verschiedenen Richtungen verschieden ist; das kommt auf dasselbe hinaus wie die Annahme, daß die elektrische Verschiebung eine lineare Vektorfunktion der Feldstärke ist. Damit kann er dann ableiten, daß die beiden Wellen senkrecht zueinander polarisiert sein müssen. Das Theorem, welches er in § 799 aufstellt, daß alle guten Leiter sehr undurchsichtig sind, hat sehr viele Ausnahmen, und besonders schwierig ist die Tatsache des Reflexionsvermögens an Metallen zu erklären. Nur für ultrarote Strahlen stimmt das Reflexionsvermögen der Metalle mit den nach Maxwell aus den spezifischen Widerständen berechneten Werten überein, wie Hagen und Rubens nachgewiesen haben (Ann. d. Phys. 11, p. 873, 1903).

Der Widerstand gegen Maxwell richtete sich wesentlich gegen das Gesetz, daß die Dielektrizitätskonstante gleich dem Quadrat des Brechungsindex sei, und gegen die Theorie der Verschiebungsströme, und besonders in England fand Maxwell mehr Gegner als Jünger. W. Thomson hat sich z. B. nie mit dieser Theorie einverstanden erklärt; zunächst hielt er die Theorie als nicht voll aufrecht erhaltbar und wollte sie durch eine Ausbildung der alten Potentialtheorie ersetzen (Br. Ass. 1888, p. 567), und noch 1904 erklärte er: The so-called electromagnetic theory of light has not helped us hitherto (Baltimore Lectures, pref. p. 7, 1904). In Deutschland wurde die Theorie besonders durch Helmholtz und seine Schule eingeführt (s. unten).

Unabhängig von Maxwell im Anschluß an die Riemannsche Annahme, daß die Fortpflanzung elektrischer Wirkungen durch den Raum eine endliche Geschwindigkeit habe, hat Lorenz-Kopenhagen (1829—1891) eine elektromagnetische Theorie des Lichtes entwickelt (Pogg. Ann. 131, p. 243, 1867), die schließlich darauf

hinauskommt, daß alle Lichtschwingungen aus elektrischen Strömen bestehen. Aber es gelang ihm nicht, die Brechungsindizes daraus abzuleiten; jedoch hat er zuerst das Bremspotential eingeführt, indem er das elektrostatische Potential Neumanns

$$\Phi = \int (\varrho / r)\, dx\, dy\, dz$$

ersetzt durch

$$\Phi = \int \varrho \frac{\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} dx\, dy\, dz\ .$$

Durch die Maxwellsche Theorie war nun die Frage nach der Beschaffenheit des Äthers wieder in den Vordergrund gedrängt. Da ist von Interesse, daß Bjerknes aus der Vorstellung der inkompressiblen Flüssigkeit ableiten konnte, daß zwei regelmäßig schwingende Kugeln in derselben eine Anziehung ausüben bei gleicher Schwingungsphase, eine Abstoßung bei Unterscheidung um eine halbe Periode, wenn die Schwingungen in Volumenveränderung bestehen; wenn sie aber oszillieren um eine mittlere Lage, so ist die zwischen ihnen wirkende Kraft proportional in Größe und Richtung der zwischen zwei Magneten, die in der Richtung der Oszillationen liegen (Göttinger Nachr. 1876, p. 245). Die elastischen Voraussetzungen für das Medium bei Bjerknes decken sich nahezu mit denen, welche schon Mac Cullagh 1839 für den Äther angenommen hatte, mit einer Elastizität wie ein fester Körper; er nannte diesen Äther „rotationally elastic" und zeigte die Übereinstimmung mit Fresnels Wellentheorie (Coll. Works, p. 145).

Was Mac Cullagh für die Lichtschwingungen gezeigt hatte, hat dann Fitzgerald (1851—1891) für die elektromagnetischen Erscheinungen in einem solchen Äther abgeleitet (Phil. Trans. 1880, p. 691). Diese Fitzgeraldsche Darstellung führte dann zu den mechanischen Modellen des elektromagnetischen Feldes, wie sie von Sommerfeld (Wied. Ann. 96, p. 139, 1892) und Larmor (Phil. Trans. 185, p. 719, 1893, und 190, p. 210, 1897) dargestellt sind. Eine Erweiterung der Bjerknesschen Beobachtung lieferte Leahy (Camb. Trans. 14, p. 45 u. 188, 1885), indem er statt der Kugeln „oszillierende Fäden" in diesem elastischen Medium betrachtete und darin eine Verschiebung ableitete, die der magnetischen Kraft entspricht, welche von einem in Richtung des Fadens fließenden Strome erzeugt wird. Die immerhin berechtigte Frage, wie man sich einen solchen Äther auch denken könne, beantwortete Thomson (1824—1908), damals schon Lord Kelvin, in zwei Abhandlungen,

die auch den Cauchyschen labilen Äther umfaßten (Phil. Mag. 26, p. 414 u. 500, 1888, und C. R. 1889). Die Versuche von Bjerknes, welche er mit zwei kleinen Trommeln oder auch zwei Kugeln anstellte, führten endlich auch zu der Theorie von Korn, welcher auch die Gravitation auf solche in einer inkompressiblen, vollkommenen Flüssigkeit eingebetteten Kugeln aufbauen wollte (Eine Theorie der Gravitation und der elektrischen Erscheinungen, 1898).

Die Frage, ob die ablenkenden Wirkungen eines Magneten auf einen elektrischen Strom, die bisher immer mit ponderomotorischen Wirkungen verknüpft beobachtet waren, auf die Elektrizität selbst oder auf die geladenen Massen stattfinde, wurde durch die Beobachtung von Hall dahin entschieden, daß die strömende Elektrizität selbst abgelenkt wird (Amer. Journ. of Math. 2, p. 287, 1880). Der „Halleffekt" machte besonders dadurch große Schwierigkeiten, weil die veränderte Ablenkungsrichtung des Stromes in diamagnetischen und paramagnetischen Platten sich nicht auf Nickel bezieht, dies benimmt sich hier diamagnetisch, und Antimon, welches sich wie Eisen verhält. So war der erste einfache Erklärungsversuch Halls, daß nämlich die Elektrizität selbst ohne ponderablen Träger im Magnetfeld abgelenkt werde, nicht stichhaltig. Der Einfluß der Dicke der Platte sowie der Länge und Breite sind von v. Ettinghausen und Nernst untersucht (Ber. Wien 94, p. 560, 1886), ohne ein allgemeingültiges Gesetz zu erbringen. Auch die Abhängigkeit von der Stärke des Magnetfeldes ist bei den verschiedenen Substanzen sehr verschieden. Auch verschiedene Anordnungen, wie sie Righi (Acc. d. Lincei 1883, 7. Juni) angab, lieferten verschiedene Werte. Auch der Einfluß der Temperatur, den Hall untersuchte (Sill. Journ. 19, p. 117, 1885), war für die verschiedenen Substanzen verschieden und nicht gesetzmäßig. Die Erklärungsversuche müssen natürlich bei den durchaus ungesetzmäßigen Ergebnissen der Versuche auch nur beschränkte Gültigkeit haben. Boltzmanns Theorie (Ber. Wien 94, p. 644, 1886) bezieht sich nur auf die Gestalt der Platte, nicht auf das Material. Immerhin stellte sich bei den Versuchen heraus, daß ein Magnetfeld auf die elektrostatische Polarisation eines Dielektrikums keinen Einfluß hat, wie von van Aubel experimentell (Bull. Brüssel 10, p. 609, und 12, p. 280, 1885/86) und von Lorentz theoretisch nachgewiesen ist (Arch. Néerl. 19, p. 123, 1884).

Die Weiterbildung und Ergänzung der Maxwellschen Theorie wurde zunächst durch Helmholtz angeregt. Bei Maxwell fehlte die Reflexion und Brechung des Lichtes. Schon 1870

ging Helmholtz von der Überlegung aus, daß, wenn die optische Verschiedenheit der Körper durch die Verschiedenheit der magnetischen Permeabilität verursacht sei, es umgekehrt gelingen müsse, durch den magnetischen Vektor rechtwinklig zur Ebene der Polarisation das Fresnelsche Sinus- und Tangensgesetz der Reflexion abzuleiten (Borch. Journ. 72, p. 68, Anm., 1870). Die akkurate Ausführung dieses Gedankens war die Doktordissertation von H. A. Lorentz 1875 (Ztschr. f. Math. u. Phys. 22, p. 1 u. 205, 1877).

Der nächste Fortschritt wurde von Fitzgerald gemacht (Trans. Dublin 3, 1883). Er sagte sich, wenn Licht und Elektrizität wirklich zusammengehören, muß es möglich sein, allein durch elektrische Mittel strahlende Energie zu erzeugen. Theoretisch leitet er ab, daß von einem kleinen Leiterkreise, der durch einen periodisch stärker und schwächer werdenden Strom durchflossen ist, eine strahlende Energie in Form eines magnetischen Vektors erzeugt werden muß, wenn nur die Erregung hoch genug ist. Eine so hohe Erregung liefert ihm die von Feddersen entdeckte oszillierende Entladung eines Kondensators. Bei ihm ist der Kondensator also nur als Energiesammler gebraucht und die Strahlungsquelle ist das wechselnde Magnetfeld. — Vom Poyntingschen Vektor ist schon oben berichtet. Dadurch faßt Poynting die elektrischen und magnetischen Vektoren zusammen und beweist, daß der „Energiefluß“ an einem Punkte dargestellt wird, durch das Vektorpordukt der elektrischen und magnetischen Kraft dividiert, durch 4π (Phil. Trans. 175, p. 343, 1884). In demselben Jahre setzten die Arbeiten von H. Hertz (1857—1894) ein.

Zunächst stellt Hertz die Maxwellsche Theorie auf eine einheitliche Basis. Wie es nur eine Art magnetische Kraft gibt, so auch nur eine elektrische. Dies „Hertzsche Prinzip“ (Wied. Ann. 21, p. 84, 1884) hat eine längere Diskussion hervorgerufen, indem Aulinger (ib. 27, p. 119, 1886) darauf hinweist, daß bei demselben die elektrostatische Ladung auf der Oberfläche des Leiters vergessen sei und die Boltzmannsche Lösung (ib. 29, p. 598, 1887) forderte ein bis dahin nicht realisiertes Experiment. Hertz zeigt dann, daß, wenn man den Grundgleichungen der Neumannschen Elektrodynamik Zusatzglieder hinzufügt, man die Maxwellschen Gleichungen erhält, die Hertz in der Form schreibt

$$\mathrm{rot}\,\mathfrak{H} = \frac{1}{c^2}\frac{d\mathfrak{E}}{dt} + 4\pi J \quad \text{und} \quad \mathrm{rot}\,\mathfrak{E} = -\frac{d\mathfrak{H}}{dt}\,.$$

Elektrische Wellen.

Die weiteren Arbeiten von Hertz knüpfen nun an die oben erwähnten Versuche von Feddersen über oszillatorische Entladungen von Kondensatoren an. Helmholtz zeigte solche Oszillationen in Induktionsspiralen, die an ihren Enden mit Kapazitäten verbunden waren (Verhandl. Heidelberg 1869, p. 355) und v. Bezold kam zu dem Schlusse: Wenn elektrische Wellen durch einen isolierten Draht bis an das Ende gesandt werden, so werden sie dort reflektiert. Die Erscheinung, welche diesen Prozeß in alternierenden Entladungen begleitet, scheint ihren Ursprung in der Interferenz der ankommenden und reflektierten Welle zu haben. Er stellt auch fest, daß eine elektrische Entladung sich mit der gleichen Schnelligkeit durch gleich lange Drähte von beliebigem Material fortpflanzt (Ber. München 1, p. 113, 1870). In der Richtung der Helmholtzschen Versuche liegen auch die von Mouton (C. R. 82, p. 84 u. 1387; 83, p. 142, 1876) und Schiller (Pogg. Ann. 152, p. 535, 1874), während die von Bezoldschen Beobachtungen die Fortführung bei L. Weber (Wied. Ann. 8, p. 515, 1879) fanden, der in der Leitung der sekundären Induktionsrolle bereits neutrale Punkte fand.

Hertz nahm nun statt der Feddersenschen Funken bei Entladung von Batterien die Funken der Induktionsrolle und verband durch einen Draht damit einen rechteckigen Drahtbügel, der die Kugeln eines Funkenmikrometers in sich schloß. Sobald in der Funkenstrecke der Induktionsrolle ein Funken übersprang, zeigte sich auch in der Funkenstrecke des Bügels ein solcher. Diese oszillierenden Entladungen konnten nur durch Selbstinduktion im Bügel erzeugt sein. Um das zu erweisen, trennte er den Bügel von dem Induktorium und ließ nur eine Seite in paralleler Lage zu der Funkenstrecke des Induktoriums. Die hierbei erzeugten schwachen Funken wurden wesentlich stärker, wenn er die Funkenstrecke des Induktoriums mit einer Kapazität verband (Wied. Ann. 31, p. 421, 1887). Dann zeigt Hertz, daß die durch alternierende Ströme in einem Dielektrikum hervorgerufenen veränderlichen elektrischen Polarisationen auch die elektromagnetischen Wirkungen verschieben (ib. 34, p. 273, 1888) und beweist, daß elektrische „Wellen" sich mit endlicher Geschwindigkeit in der Luft ausbreiten, daß sie reflektiert werden von Leitern, so daß an der Grenze Knotenpunkte entstehen. Er fand die Geschwindigkeit der Fortpflanzung der Welle gleich der des Lichtes und maß die Wellenlänge (ib., p. 551 u. 610). Die

Berechnung der Geschwindigkeit ergab in der Folge verschiedene Werte; z. B. berechnet Poincaré aus den Hertzschen Messungen die Geschwindigkeit = Lichtgeschwindigkeit $\times \sqrt{2}$ (C. R. 111, p. 322, 1890). Weitere Resultate s. unten. Zunächst zeigt Hertz, daß die meisten seiner Versuche durch die Maxwellsche Theorie, die er freilich anders ableitet, erklärt werden können. Schwierigkeiten bereiten nun die Versuche über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Drähten (Wied. Ann. 36, p. 1, 1889).

Dann führt er die Versuche durch mit parabolischen zylindrischen Hohlspiegeln, wodurch er Reflexion, Brechung in dem Prisma aus Hartpech, Reflexion und Beugung nachweisen konnte (ib., p. 768). Daß auch Polarisation der Wellen vorhanden ist, zeigt er ebenfalls, macht aber darauf aufmerksam, daß, wenn der elektrische Vektor in einer Richtung wirkt, der magnetische senkrecht dazu steht, so daß, wenn die elektrischen Wellen in einer Vertikalebene schwingen, die Schwingungen in horizontaler Ebene magnetischer Natur sind, worauf ja schon Maxwell (s. oben) aufmerksam gemacht hatte. Zu einem gleichen Resultat führt auch die Darstellung der elektromagnetischen Lichttheorie von Koláček (ib. 32, p. 224 u. 429, 1887; 34, p. 673, 1888), worin derselbe auch die Kirchhoffschen Gleichungen über Polarisationserscheinungen in Kristallen (Ber. Berlin 1876, p. 57) ableitet und ebenso die fundamentalen Gleichungen Drudes für Reflexion und Brechung (ib. 32, p. 584, 1887) nach der Voigtschen Elastizitätstheorie.

Für die Untersuchung der elektrischen Wellen sind von vielen Seiten abgeänderte Apparaturen vorgeschlagen gegenüber den Hertzschen. Ich hebe nur einige heraus, die besondere Verbreitung gefunden haben. Schon Hertz hatte auf die Notwendigkeit der Resonanz zwischen primärem Kreis und induziertem Kreise hingewiesen und nannte letzteren deshalb den Resonator. Damit wurde durch Beobachtung der Funkenbildung die Ausbreitung der Wellen verfolgt und die Knotenpunkte festgestellt. Eine besonders für lange Wellen ausgezeichnete Methode gab Lecher an (Ber. Wien 99, p. 310, 1890). Den mit den Kugeln des Primärkreises verbundenen großen Kondensatorplatten stehen, durch dünne Luftschicht getrennt, zwei gleiche Platten des Resonators gegenüber; aber sie sind nicht durch Leiterkreis verbunden, sondern mit zwei parallel verlaufenden, isoliert ausgespannten Drähten. An das Ende der Drähte legt er eine elektrodenlose, nahezu evakuierte Glasröhre, wie sie von Hawksbee (s. oben) erfunden war. Diese leuchtet auf, wenn Resonanz hergestellt ist. Durch eine verschiebbare

Brücke sucht man die Knotenpunkte und Wellenbäuche auf den Drähten auf. Nach dieser Methode haben unter anderen Cohn und Heerwagen mit geringer Abänderung gearbeitet (Wied. Ann. 43, p. 342, 1891), mit vielfachen Abänderungen der Versuchsbedingungen Ebert und E. Wiedemann (ib. 48, p. 549, 1893). Eine besonders für kurze Wellen gut brauchbare Methode gab Blondlot an (C. R. 114, p. 283, 1892, und 117, p. 543, 1893). Da wird der Resonatordraht auf den, einen Kreis mit der Funkenstrecke bildenden, primären Leiter isoliert aufgebunden. Dieser Resonatorkreis ist nicht ganz geschlossen, sondern an der Funkenstrecke des Primärkreises biegt der Draht in zwei parallele Stränge aus. Nach dieser Methode fand v. Geitler den Einfluß der Drahtdicke und des Abstandes der Drähte (Wied. Ann. 49, p. 184, 1893).

Für die gleichmäßige Schwingung im Primärkreise ist die Gleichförmigkeit des Funkens entscheidend; die hängt aber wesentlich von der Oberflächenbeschaffenheit der Kugeln ab, die durch die Funken in Luft schnell verändert wird. Um Gleichmäßigkeit zu erzielen, ließen Sarasin und De la Rive den primären Funken in Olivenöl, Terpentin oder Petroleum überspringen (C. R. 115, p. 439, 1892).

Daß auch die Funken der Influenzmaschine als Erreger brauchbar sind, hat Töpler gezeigt und die vielfachen Störungen untersucht (Wied. Ann. 46, p. 306, 464, 642, 1892).

Statt des Funkens oder der Röhre im Resonatorkreis benutzt Rubens bei der Lecherschen Anordnung sein Bolometer (ib. 42, p. 154, 1891), welches er mit Paalzow gemeinschaftlich konstruiert hatte (ib. 37, p. 529, 1889). Birkeland hat eine eigenartige Kombination von Funkenmikrometer bei der Lecherschen Anordnung mit der Hauptleitung hergestellt, um mit einem Telephon die Knoten und Bäuche aufsuchen zu können (C. R. 116, p. 93, 1893).

Die Dämpfung der Wellen in dem Resonator ist zuerst von Bjerknes untersucht (Wied. Ann. 44, p. 74, 1891); sie ist stets sehr groß, hängt aber ab von dem Material. Natürlich hängen die Schwingungen im Resonatorkreise wesentlich von der Dämpfung im primären Kreise ab (C. R. 115, p. 725, 1892). Es zeigt sich eine Zunahme des log. Dekrements und so ein schnelles Abklingen.

Nach vielen Versuchen über die Geschwindigkeit der Fortpflanzung in Luft und in Drähten sind abschließend die Untersuchungen von Sarasin und De la Rive (C. R. 112, p. 658, 1891; 115, p. 1272, 1893) und von Dufour (ib. 118, p. 1039, 1894) zu nennen, wodurch festgestellt ist, daß dieselbe in Drähten gleich der

in Luft ist. Abweichende Resultate sind durch die Reflexion und andere störende Einflüsse der Umgebung erklärbar.

Die erstgenannten Forscher hatten schon 1889 die sogenannte „multiple Resonanz" untersucht. Mit der Lecherschen Anordnung stellen sie fest, daß mit ein und demselben Resonatorkreis stets die gleiche Lage der Knoten gefunden wird. Da aber verschiedene Resonatoren bei gleichem Primärkreis ansprechen, schließen sie, daß zwischen bestimmten Grenzen durch den Erreger alle möglichen Wellenlängen erzeugt werden, aus welchen der einzelne Resonator die seiner Eigenschwingung entsprechende auswählt (Arch. Genève 22, p. 282, 1889, und 23, p. 113, 1890). Diese Frage ist eingehend untersucht von Bjerknes (Wied. Ann. 44, p. 92, 1891). Er erhält das Resultat, daß in der Primärleitung die Schwingungen die Form einer gedämpften Sinuskurve ergeben. Das gleiche Resultat findet mit Blondlotscher Apparatur Pérot (C. R. 114, p. 665, 1891). Mit einer Abänderung der Warburgschen Röhren mit elektrolytisch niedergeschlagenem Natriumspiegel (Wied. Ann. 40, p. 1, 1890) fand Zehnder ein überaus empfindliches Instrument für die Aufsuchung der Knoten und Bäuche elektrischer Wellen, die sogenannte Zehnderröhre (ib. 47, p. 77, 1892). Mit ihr zeigte er nicht nur Brechung, Beugung, Interferenz (ib. 53, p. 162, 1894), sondern auch mit zwei parallelen, aber um 90° gegeneinander gedrehten Drahtgittern die elliptische und zirkulare Polarisation der elektrischen Wellen (ib., p. 505). Mit solchen Röhren hat Drude (1863—1906) die Verteilung der elektrischen und magnetischen Kraft in der Umgebung einer elektrischen Schwingung untersucht (ib. 52, p. 499, 1894) und die multiple Resonanz bestätigt. Eine abschließende Untersuchung über die Resonanz ist dann von Bjerknes geliefert (ib. 55, p. 121, 1895).

Branly machte die zunächst unerklärte Beobachtung, daß metallische Feilspäne, lose in einer Röhre angehäuft, einen sehr großen Widerstand für den elektrischen Strom haben, daß aber durch den Einfluß einer oszillatorischen elektrischen Entladung dieser Widerstand sehr vermindert wird (C. R. 111, p. 785, 1890). Branly hatte in eine Röhre Kupferspäne getan, die er in den Leitungskreis eines Galvanometers einschaltete; dann zeigte dieses Strom an, sobald oszillatorische Entladungen von einer Verstärkungsflasche in der Nähe entstanden. Diese Vorrichtung benutzte Lodge in dem Hertzschen Resonator und nannte die Röhre „Kohärer" (The work of Hertz). Diese Branlysche Röhre wandte Biernacki im Brennpunkt des zweiten Hertzschen Spiegels an, um durch

die Widerstandsverminderung den durch drei Bunsenelemente, Galvanometer und Röhre gegebenen Stromkreis so stark zu machen, daß der Ausschlag der Galvanometernadel deutlich wird, sobald elektrische Wellen die Röhre treffen. Mit einer solchen Apparatur untersuchte er verschiedene Körper in bezug auf Doppelbrechung für Elektrizität, z. B. das Eis (Wied. Ann. 55, p. 599, 1895).

Weiterbildung der Maxwellschen Theorie.

Für die Maxwellsche Theorie war es von Wert, zu untersuchen, ob ein bewegtes Dielektrikum in einem elektrischen Kraftfelde nun auch elektrodynamische Kraft erzeugen kann, d. h. es mußte das Pendant zu dem Rowlandschen Versuche gefunden werden. Das tat Röntgen, indem er zeigte, daß ein Dielektrikum (Glasplatte), im Inneren zwischen zwei geladenen Kondensatorplatten rotierend, eine Magnetnadel ablenkt. Die Richtung der Ablenkung hängt von der Richtung der elektrischen Kraftlinien des Feldes ab. Durch Kommutation dieser ändert man auch die Ablenkung der Nadel (Wied. Ann. 35, p. 264, 1888, und 40, p. 93, 1890). Dies Röntgensche Experiment ist eine wichtige Ergänzung zu dem Rowlandschen. Denn wenn U die Potentialdifferenz zwischen den beiden Ladungen der Kondensatorflächen und ε die Dielektrizitätskonstante des Mediums ist, so ist die Oberflächendichte der elektrischen Ladung auf den Kondensatorplatten proportional $\pm \varepsilon U$ und die fiktive Ladung auf der Oberfläche des Dielektrikums ist $\mp (\varepsilon - 1) U$. Daraus folgt, daß, wenn, wie bei Rowland, die Kondensatorebene in ihrer eigenen Ebene rotiert, während das Dielektrikum ruht, das erzeugte magnetische Feld proportional ε ist, wenn dagegen, wie bei Röntgen, das Dielektrikum rotiert und die Kondensatorladungen ruhen, das magnetische Feld proportional $(\varepsilon - 1)$ ist; rotieren beide, so ist die magnetische Aktion unabhängig von ε, das ist durch die Experimente Eichenwalds (Ann. d. Phys. 11, p. 421, 1903, und 13, p. 919, 1904) bestätigt. Er beobachtete das Magnetfeld, welches durch die veränderte Polarisation in einem Dielektrikum erzeugt wird, wenn es sich in einem unhomogenen elektrischen Felde bewegt.

Unabhängig von Hertz kam O. Heaviside zu einer Umarbeitung und Vervollständigung der Maxwellschen Theorie, über welche er seine erste Abhandlung im Electrician 1885, Febr., veröffentlichte. Eine Reihe von sieben weiteren Publikationen in Phil. Mag. 1886 und 1887 und die beiden Arbeiten in Phil. Mag. 27,

p. 324, 1889 und Phil. Trans. 183, p. 423, 1892, ergaben die Theorie, welche in den beiden Werken Electrical papers, 1892, und Electromagnetic Theory, 1894, zusammengefaßt ist. Er selbst nennt seine Theorie die Duplextheorie. Bisweilen wird das darauf bezogen, daß er von den beiden Grundgleichungen

$$\mathrm{rot}\,(\mathfrak{H} - h) = J \quad \text{und} \quad -\,\mathrm{rot}\,(\mathfrak{E} - e) = \mathfrak{G}$$

ausgeht, welche den Hertzschen Gleichungen entsprechen. Heaviside selbst führt den Namen anders ein. Er unterscheidet von der Gesamtkraft die impressed force, wodurch dem System Energie mitgeteilt wird, z. B. die Voltaschen elektromotorischen Kräfte, oder die permanente Magnetisierung. Darum unterscheidet er zwischen der Kraft $\mathfrak{E}'$, welche den Elektrizitätsfluß ϑ (the flux) bestimmt, und der Kraft $\mathfrak{E}$, deren Rotor den elektrischen Strom darstellt; ebenso unterscheidet er die Magnetkräfte, so daß, wenn e und h die eingeprägten Kräfte sind, die Beziehungen bestehen: $\mathfrak{E}' = \mathfrak{E} + e$; $\mathfrak{H}' = \mathfrak{H} + h$. Man muß daher den elektrischen Strom in einem bewegten Medium auffassen als aus vier Ausdrücken zusammengesetzt: dem Leitungsstrom, dem Verschiebungsstrom, dem Konvektionsstrom und dem Strome der dielektrischen Verschiebung, so daß der Gesamtstrom ist:

$$\mathfrak{S} = \vartheta + J + \varrho\, w + \mathrm{rot}\,[\vartheta \cdot w]\,,$$

wo $\varrho \cdot w$ der Leitungsstrom und w die Geschwindigkeit ist; der Zusammenhang zwischen Strom und magnetischer Kraft ist dann gegeben durch die Gleichung $\mathrm{rot}\,(\mathfrak{H}' - h_0) = 4\pi\,\mathfrak{S}$, wo h_0 die eingeprägten magnetischen Kräfte außer den durch die Bewegung des Mediums induzierten bedeutet. So ist die Theorie Heavisides umfassender als die von Maxwell und Hertz, allerdings nur in der Form; denn im Einzelfalle, wo eingeprägte Kräfte auftreten, müssen diese doch speziell untersucht werden. Auf die weitere Darstellung ist hier nicht möglich einzugehen; nur hebe ich noch seine Behandlung der Leitung der elektrischen Wellen hervor, die nicht in den Leitungsdrähten, sondern nur in dem umgebenden dielektrischen Medium fortschreiten, und seine Betrachtung über die Drahtleitungen, wo er zuerst den Selbstinduktionskoeffizienten berücksichtigt.

Man hat aus der Tatsache, daß Hertz in seinen Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft (p. 209) Heaviside eine Priorität zugeschrieben hat, bisweilen die Folgerung gezogen, daß Hertz mit seinen Untersuchungen überhaupt von Heaviside

abhängig sei. Das ist aber nicht der Fall. Hertz hat schon in seiner ersten oben charakterisierten Arbeit von 1884, also ein Jahr vor Heavisides erster Arbeit, die fundamentale Bedeutung der beiden Grundgleichungen erkannt, daß er nicht, wie Heaviside, von vornherein diese an die Spitze stellte, ist durch die Verhältnisse in Deutschland damals begründet. Wohl kannte man Maxwells Treatise allgemein, aber die Elektrodynamik stand noch auf den Grundsätzen von Neumann usw. Die wollte Hertz von diesen zu den Maxwellschen überführen, und zwar zu den beiden Grundgleichungen. Es war gewissermaßen ein pädagogisches Interesse. Daß er dann die Fortsetzung dieser Arbeit, nur von diesen Gleichungen ausgehend, die Elektrodynamik zu entwickeln, etwas hinausschob, so daß ihm Heaviside in dieser Beziehung zuvorkam, lag daran, daß er die elektrischen Wellen entdeckte und zunächst dieses Gebiet ausbauen mußte. Für diese Entdeckung hat Hertz keinen Konkurrenten. Es ist darum ganz gerechtfertigt, die Gleichungen die Hertzschen zu nennen.

Einen anderen Weg schlägt Drude in seinem Buche: Die Physik des Äthers (1894) ein. Er geht von grundlegenden Experimenten aus, setzt voraus, daß alle Eigenschaften des magnetischen Feldes auf Nahewirkungen zurückzuführen seien und diese Eigenschaften eine Einheit bilden, so daß die sogenannten Verschiebungsströme aus den beobachtbaren Wirkungen der Leitungsströme abgeleitet werden können. Das Resultat ist Ableitung der Hertzschen Gleichungen. Dann leitet er experimentelle Methoden ab für die Dielektrizitäts- und Magnetisierungskonstante usw. und widmet ein Kapitel den elektrischen Schwingungen, worin er die Grundzüge einer elektromagnetischen Theorie des Lichtes ableitet.

Die Maxwellsche Theorie hatte keine Rücksicht auf Dispersion und selektive Absorption genommen. Die notwendige Erweiterung in dieser Richtung lieferte Ebert (1861—1913); indem er nicht nur wie Maxwell die ersten, sondern auch die höheren Ableitungen des elektrokinetischen Bewegungsmomentes nach der Zeit mitberücksichtigt, kann er Strömungsgleichungen ableiten, die zu den Schwingungsgleichungen führen, die Helmholtz für Dispersion und Absorption abgeleitet hat (Pogg. Ann. 154, p. 582, 1875; Wied. Ann. 48, p. 389, 1893). Die Ebertsche Ableitung (ib. 48, p. 1, 1893) gibt auch die von Lommel (1837—1899) gefundene Theorie der Absorption und Dispersion des Lichtes (Wied. Ann. 3, p. 251 u. 339, 1878).

Auf eine noch breitere Basis versuchte Helmholtz die Max-

wellsche Theorie zu stellen durch die von ihm aufgestellte Zykeltheorie, die nicht nur die elektromagnetischen und optischen, sondern auch die hydrodynamischen Bewegungsvorgänge umfassen soll (Journ. f. reine u. angewandte Math. 97, p. 111 u. 317, 1884). Die Zyklen sind ja in jedem System möglich, denn sie setzen nichts änderes voraus, als daß sich die Gesamtkonfiguration aller einzelnen Teile immer in gleicher Weise reproduziert, so daß die allgemeinen Koordinaten ψ der sich bewegenden Teile gar keine Rolle spielen, sondern nur die $\dot{\psi}$, die Helmholtz die zyklischen Geschwindigkeiten nennt oder Hertz in seiner Mechanik die zyklischen Intensitäten, während die Parameter bestimmen, wie die Zyklenbewegung vor sich gehen soll. Je nachdem ein oder mehrere Parameter wirksam sind, hat man Monozyklen oder Polyzyklen. Helmholtz behandelt beide zunächst ganz allgemein, gibt aber auch einige Beispiele an. Wir haben oben schon gesehen, daß Maxwell die Kraftlinien als Achsen für rotatorische Bewegungen auffaßte, wobei die Drehungsgeschwindigkeit der Stromstärke entspricht, denen die Spannungen proportional sind. Nun hat Ebert gezeigt (Wied. Ann. 51, p. 268, 1894), daß mit diesen Vorstellungen der Helmholtzschen Zyklen unter Beachtung des Energieprinzips die Hertzschen Gleichungen für leitende und nichtleitende, ruhende und bewegte Medien abgeleitet werden können. Insbesondere spielen die reziproken Eigentümlichkeiten der Zyklen eine Rolle bei der Ableitung der Elektrodynamik und der Induktion, wie Ebert zeigt (ib. 52, p. 417, 1894). Zusammenfassend findet man diese Ableitungen in dem Schlußkapitel von Eberts Magnetischen Kraftfeldern. Das Gesamtgebiet der elektromagnetischen Theorie des Lichts behandeln zahlreiche Lehrbücher. Ich hebe von ihnen folgende hervor: Tumlirz, Elektromagnetische Theorie des Lichtes, 1883; Boltzmann, Über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes, 1891; H. Poincaré, Électricité et Optique, I, 1890; H. von Helmholtz, Vorlesungen über die elektromagnetische Theorie des Lichtes, herausg. von A. König und C. Runge, 1897. Die Reihenfolge dieser Werke gibt am besten die Entwicklung der elektromagnetischen Lichttheorie.

Strahlungsgesetz.

Für die elektromagnetische Lichttheorie war es von größter Bedeutung, den Zusammenhang mit den Strahlungsgesetzen, die bis dahin schon abgeleitet waren, herzustellen. Kirchhoff

hatte 1859 der Berliner Akademie bereits eine Mitteilung gemacht über das konstante Verhältnis des Emissions- und Absorptionsvermögens für Strahlen derselben Wellenlänge bei allen Körpern und darin den Grund angegeben, warum das Drapersche Gesetz, daß alle festen Körper bei derselben Temperatur zu glühen beginnen (Phil. Mag. 30, p. 345, 1847), wenn die Phosphoreszenz ausgeschlossen ist, für durchsichtige Gase nicht gilt (Ges. Abh., p. 566). Dann hatte er den vollkommen schwarzen Körper definiert, welcher alle Strahlen, die auf ihn fallen, absorbiert, also weder reflektiert noch hindurchläßt (Pogg. Ann. 109, p. 275, 1860, und Ges. Abh., p. 571) und in § 17 bereits angegeben, wie ein solcher schwarzer Körper herstellbar sei. Dann hatte Stefan aus den bis dahin vorliegenden Strahlungsmessungen bereits abgeleitet, daß die Gesamtstrahlung eines Körpers proportional der vierten Potenz seiner absoluten Temperatur sei (Ber. Wien 79, p. 391, 1879). Boltzmann zeigte nun, ausgehend von der Maxwellschen Theorie, daß für schwarze Körper dies Stefansche Gesetz theoretisch begründet ist (Wied. Ann. 22, p. 291, 1884). Lommel hatte zuerst den Versuch gemacht, ein vollständiges Strahlungsgesetz, welches auch Fluoreszenz und anomale Dispersion enthielt, aufzustellen (Wied. Ann. 3, p. 251 u. 339, 1878), unter der Annahme, daß die Schwingungen eines homogenen Strahles den Pendelschwingungen entsprechen und einiger spezieller Annahmen. Michelson geht dagegen, um das gleiche zu erreichen, von dem Maxwellschen Gesetz der Verteilung der Geschwindigkeiten unter einer großen Anzahl von Molekülen aus, die den Gasgesetzen unterliegen, und dehnt dies Gesetz auch auf feste Körper aus (Journ. de Phys. 6, 1887). Er muß aber auch noch eine Reihe von speziellen Annahmen hinzufügen, so daß auch sein Versuch keine allgemeine Lösung bietet. Nun hatte E. Wiedemann schon darauf aufmerksam gemacht, daß auch für die Strahlung der Temperaturbegriff eingeführt werden müsse (Wied. Ann. 34, p. 447, 1888; 38, p. 487, 1889). Daß außer der Temperatur besonders auch der zweite Hauptsatz der Wärme für die Strahlung von Bedeutung ist, zeigte W. Wien (ib. 52, p. 132, 1894). Dann findet Wien, indem er wie Michelson das Maxwellsche Verteilungsgesetz voraussetzt, die Energieverteilung im Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers und findet das Strahlungsgesetz für die Wellenlänge λ, wenn φ_λ die Intensität der Strahlung bedeutet $\varphi_\lambda = \frac{C}{\lambda^5} e^{-\frac{c}{\lambda\vartheta}}$; wo ϑ die absolute Temperatur bedeutet und C eine Konstante, c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist (ib.

58, p. 662, 1896). Die Schlußfolgerungen von Wien finden eine Stütze in den experimentellen Untersuchungen von O. Lummer und Pringsheim (ib. 63, p. 395, 1897) und den sehr ausführlichen Beobachtungen von Paschen (ib. 58, p. 455, 1896, und 60, p. 662, 1897). Dann hat Planck in einer Reihe von Arbeiten aus den Jahren 1897—1899, welche in den Berichten der Berliner Akademie enthalten sind, die irreversiblen Strahlungsvorgänge untersucht und die Frage nach dem Strahlungsgesetz zu einem gewissen Abschluß gebracht. Die Zusammenfassung dieser wichtigen Arbeiten bietet Planck selbst (Ann. d. Phys. 1, p. 69, 1900). Die schon von Maxwell gewünschte Ausdehnung der elektromagnetischen Lichttheorie auch auf Wärmestrahlung forderte die Erklärung bzw. Ableitung des die Wärme beherrschenden zweiten Hauptsatzes aus den Prinzipien der elektromagnetischen Theorie. Dabei ist notwendig die Absorption von Wärmestrahlen als eine Resonanzerscheinung aufzufassen. Daraus ergibt sich, daß die Dämpfung der elektrischen Schwingungen eines Oszillators nur durch die Ausstrahlung elektromagnetischer Energie verursacht wird.

Nun zeigt Planck, daß die Maxwellschen Gleichungen allein nicht ausreichen, eine eindeutige Lösung des Strahlungsproblems zu geben. Es bedarf einer neuen Hypothese. Die führt Planck durch den Begriff der natürlichen Strahlung ein, die sich mit den Worten ausdrücken läßt: Die Energie der Strahlung verteilt sich vollkommen unregelmäßig auf die einzelnen Partialschwingungen, aus denen der Strahl zusammengesetzt werden kann. Diese Annahme hat eine Parallele in der von Boltzmann in die Gastheorie eingeführten Hypothese der molekularen Unordnung. Planck stellt dann die Intensität der erregenden Schwingung in der Form eines Fourierintegrals dar. Für den Resonator beweist er: „Die in einem Zeitelement vom Resonator emittierte Energie ist proportional der Energie des Resonators, seiner Schwingungszahl und seinem log. Dekrement.“ Und entsprechend seiner Auffassung der Absorption als eines Resonanzvorganges ergibt sich: „Die in einem Zeitelement vom Resonator absorbierte Energie ist proportional der in der erregenden Schwingung enthaltenen Intensität seiner Eigenperiode, seinem log. Dekrement, dem Kubus der Lichtgeschwindigkeit und umgekehrt proportional der Schwingungszahl.“ Daraus ergibt sich die Fundamentalgleichung zwischen der Energie des Resonators U_0 und der seiner Schwingungszahl entsprechenden Intensität der erregenden Schwingung J_0. Für konstante Bestrahlung ist dann $U_0 = 3\,c^3 \cdot J_0 / 32\,\pi^2 \nu_0^2$, wo c die

Lichtgeschwindigkeit, ν_0 die Schwingungszahl bedeuten. Damit kann Planck nun die Gesamtstrahlung in dem den Resonator umgebenden Felde behandeln. So findet er die totale Energie eines durchstrahlten Vakuums und einer darin befindlichen Anzahl von Resonatoren. Ebenso definiert er die totale elektromagnetische Entropie dieses Systems und findet damit den Weg zu einer thermodynamischen Deutung der elektromagnetischen Strahlungsvorgänge. Für die Änderung der Entropie beweist er, daß sie stets positiv sein muß, und nennt den Zustand, dem das absolute Maximum der totalen Entropie entspricht, stationär. Der stationäre Strahlungszustand des Vakuums entspricht den Bedingungen der Strahlung des schwarzen Körpers und für ihn ergibt sich das Stefansche Strahlungsgesetz und für die Verteilung der Energie im Normalspektrum ein Ausdruck, der dem Wienschen völlig entspricht, wenn man für die Wiensche Konstante C setzt $2\,c^2\,b$. Beim Übergang vom Vakuum auf ein beliebiges diathermanes Medium ergibt sich der Kirchhoffsche Satz, daß die Strahlungsintensitäten des schwarzen Körpers in zwei verschiedenen Medien bei gleicher Temperatur sich umgekehrt verhalten wie die Quadrate der Lichtgeschwindigkeiten. Durch zahlreiche Messungen stellte sich heraus, daß dies Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum nicht allgemein Gültigkeit habe. Darum prüft Planck seine Ableitung noch einmal (ib. 4, p. 553, 1901). Die Entropiebestimmung erweist sich als unzulänglich, ihre Abhängigkeit von der Energie ist eine kompliziertere. Es ergibt sich, daß sie eine Funktion von U/ν ist. Mit Hilfe des Wienschen Verschiebungsgesetzes ergibt sich, daß das Energieelement ε proportional der Schwingungszahl ν sein muß, also $\varepsilon = h \cdot \nu$ (ib., p. 561). Ich habe diese Ableitung von Planck, obwohl sie über die Zeitgrenze dieses Buches etwas hinausgeht, so ausführlich geschildert, weil sie die um 1893 einsetzende Untersuchung abschließt und weil die so gefundene Quantentheorie zu den wesentlichsten Grundlagen der modernen Physik gehört. Aus den Beobachtungen von Kurlbaum (Wied. Ann. 65, p. 759, 1898) und denen von Lummer und Pringsheim (Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 2, p. 176, 1900) berechnet Planck die universelle Konstante $h = 6{,}55 \cdot 10^{-27}$ erg-sec.

Das von Plank benutzte Verschiebungsgesetz war von Wien schon aus seinen Arbeiten über die Strahlung schwarzer Körper abgeleitet, die sich an Kirchhoffs oben erwähnte Arbeiten anschließen. Er hatte daraus das Cos.-Gesetz abgeleitet (Wied. Ann. 45, p. 712, 1892) und die Strömungskomponenten der Energie be-

rechnet. Wien betrachtet dann die Strahlung, losgelöst von dem strahlenden Körper, eingeschlossen in einen Raum mit veränderlichem Volumen durch Verschiebung einer spiegelnden Fläche; dann zeigt er, daß die Wellenlänge dem Dopplerschen Prinzip entsprechend geändert wird durch die Reflexion an dem bewegten Spiegel nach dem Gesetz $\lambda_1 = (c + 2v \cos\alpha)\lambda_0/c$, wo c die Lichtgeschwindigkeit, v die Geschwindigkeit des Spiegels, α der Winkel zwischen Strahl und Spiegelnormale, λ_0 die ursprüngliche Wellenlänge, λ_1 die Wellenlänge nach einer Reflexion ist (Ber. Berlin 1893, p. 55). Aus diesem Verschiebungsgesetz zieht Wien dann die Folgerungen, um Temperatur und Entropie der Strahlung zu bestimmen (Wied. Ann. 52, p. 132, 1894). Daraus hat Planck (l. c.) dann abgeleitet die Entropie des in einem diathermanen Medium schwingenden Resonators $S = f\left(\frac{U}{\nu}\right)$.

Direkte Beziehungen zwischen Licht und Magnetismus hatten die Forscher, welche sich mit der Drehung der Polarisationsebene im magnetischen Felde beschäftigten, zu finden gehofft, allein Wien beklagt es in der eben zitierten Abhandlung (p. 146) mit Recht, daß keinerlei Beziehungen zwischen magnetischer Energie und Strahlungsenergie dadurch aufgedeckt sind. Obwohl Sohncke gezeigt hatte, daß auch eine Beziehung zwischen Magnetismus und unpolarisiertem Lichte bestehe (ib. 27, p. 213, 1886). Daß die Drehung für verschiedene Wellenlängen verschieden groß ist, wurde von Verdet (1824—1866) nachgewiesen (Ann. de Chim. et de Phys. 69, p. 1, 1863) und Wiedemann hatte gezeigt, daß die Drehung bei abnehmender Wellenlänge zunimmt (Pogg. Ann. 82, p. 215, 1851). Auch die sehr ausgedehnten Untersuchungen von H. Becquerel (C. R. 1875—1880), sowie die negativ ausgefallenen Versuche von Hirsch (Wied. Ann. 48, p. 446, 1893), einen Einfluß der Temperatur festzustellen, hatten eine allgemeine Gesetzmäßigkeit nicht ergeben. Es kann nicht meine Aufgabe sein, die zahlreichen Versuche und Messungen über die Drehung in den verschiedenen Medien hier zu charakterisieren. Nur mag erwähnt werden, daß Kundt und Röntgen diese Drehung auch in Gasen und Dämpfen nachwiesen (Wied. Ann. 6, p. 332, 1879; 8, p. 278, 1879; 10, p. 257, 1880) und gleichzeitig analoge Resultate von H. Becquerel (Journ. d. Phys. 8, p. 198, 1879; 9, p. 265, 1880) gefunden wurden. Daß auch Wärmestrahlen eine Drehung der Polarisationsebene erfahren, war schon von Wartmann (C. R. 22, p. 745, 1846) nachgewiesen; abschließende Versuche in dieser Richtung stellte Grunmach (Wied. Ann. 14,

p. 85, 1882) an. Beachtenswert scheinen die Versuche Cornus zu sein, die Lichtwellenfläche für ein isotropes Medium in einem homogenen Magnetfelde zu bestimmen. Er setzt voraus, daß der Lichtstrahl mit der magnetischen Kraft den Winkel α bildet, daß in dem Lichtstrahl links und rechts zirkular polarisierte Wellen sich mit den Geschwindigkeiten v' und v'' fortpflanzen, so daß $\frac{v_, + v_{,,}}{2}$ die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ohne Einwirkung des Magnetfeldes sei. Ist dann $\mathfrak{H}$ die Intensität des magnetischen Feldes, so wäre $v_1 = v - k \cdot \mathfrak{H} \cdot \cos\alpha$ und $v_{,,} = v + k \cdot \mathfrak{H} \cdot \cos\alpha$. Daraus berechnet er, daß senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien eine Doppelbrechung entstehen muß (C. R. 99, p. 1045, 1884). In dieser Richtung liegen auch die Untersuchungen von Fleischl (Ber. Wien 90, p. 1151, 1884) und Sternberg (ib. 94, p. 95, 1886). Über den Kerreffekt ist oben berichtet. Auch Zeeman untersuchte den Kerreffekt an Eisen, Nickel und Kobalt (Arch. Néerl. 27, p. 282, 1893). Doch erst durch die von H. A. Lorentz gegebenen Vorstellungen (s. unten) kam Zeeman zu der Entdeckung, welche dann auch eine Erklärung für die Drehung der Polarisationsebene liefert. Ich meine die Entdeckung des Zeemaneffekts im Jahre 1896. Dessen erste Veröffentlichung Zittingsverslagen Akad. Wet. Amsterdam 1896, 5, p. 181, 242; 6, p. 13, 99, 1897; zusammen mit der Lorentzschen Erklärung (Phil. Mag. 43, p. 226, 1897). Der Versuch bestand darin, daß die D-Linie der Kochsalzflamme in einem Magnetfelde bei schwacher Feldstärke im Spektrometer eine starke Verbreiterung zeigt, aber in starkem Felde gespalten wird, so zwar, daß bei Beobachtung in der Richtung der Kraftlinien ein Duplet entsteht, in der zu den Kraftlinien senkrechten ein Triplet beobachtet wird. Die Erklärung dieser Erscheinung benutzt die oben von Cornu gegebene Vorstellung der beiden zirkular polarisierten Wellen und die Lorentzsche Elektronentheorie (s. unten).

Die verschiedenen Bemühungen um eine Einordnung der Erscheinungen der Drehung der Polarisationsebene in die Theorie des Magnetismus bzw. in die elektromagnetische Lichttheorie, von denen ich die Faradays und C. Neumanns schon erwähnt habe, lassen sich in drei Gruppen zerlegen. Die erste umfaßt die Versuche, durch Hinzufügung von Gliedern an die Gleichung der Lichtausbreitung auch die magnetischen Einwirkungen auszudrücken. Dahin gehören die Theorien von Airy (Phil. Mag. 28, p. 469, 1867), Goldhammer (Wied. Ann. 46, p. 71, 1892) und Drude (ib., p. 353, 1892). Entweder verzichten die Autoren ganz auf eine physikalische

Deutung, oder suchen, wie Drude, den Zusatzgliedern nachträglich physikalischen Inhalt zu geben. Die zweite Gruppe versucht durch spezielle physikalische Hilfsannahmen solche Glieder zu bekommen, daß die Erscheinungen erklärbar erscheinen. Dahin gehören Fitzgerald (Proc. R. S. 25, p. 447, 1876) mit der Annahme, daß für rechts und links zirkular polarisiertes Licht die Brechungsindices verschieden sind, Rowland (Sill. Journ. 3, p. 89, 1880), der den Halleffekt heranzieht, H. A. Lorentz (Arch. Néerl. 19, p. 123, 1884), Mascart (C. R. 105, p. 661, 1887), dessen Theorie schließlich darauf hinauskommt, daß die Neumannsche Gleichung für die Drehung noch den Faktor λ^{-1} bekommt, daß also die magnetische Wirkung umgekehrt proportional der Wellenlänge sei, Thomson, der der Maxwellschen Formel noch Wirbelbewegungen anfügte, welche im Magnetfelde entstehen sollten (Rep. Brit. Ass. 1893, p. 335); ähnlich so v. Schaik (Arch. Néerl. 21, p. 406, 1887), der an die Lommelsche Gleichung noch Molekularwirbel anfügte. Endlich die dritte Gruppe, welche für die Lichtbewegung selbst eine Hypothese aufstellt, z. B. Vaschy (C. R. 108, p. 88, 1889), welcher annimmt, daß die ponderable Materie an der Lichtbewegung teilnimmt, und zwar abhängig von der Wellenlänge. Endlich Potier (ib., p. 510, 1889), der der Annahme von Vaschy noch hinzufügte, daß in den durchsichtigen Medien kleine Molekularmagnete enthalten seien, die für gewöhnlich ruhen und den Kraftlinien entsprechend orientiert sind, aber bei Lichtbewegung sich dieser anschließen. Speziell für die Drehung bei Reflexion hat Righi die Annahme gemacht daß die magnetische Wirkung auf die Lichtschwingungen auch abhänge von dem Sinne der Schwingung, ob rechts- oder linkspolarisiert, und damit den Kerreffekt erklären können (Atti 282, p. 367, 1884; Ann. de Chim. et de Phys. 8, p. 65, 1886).

Kathodenstrahlen.

Das im luftverdünnten Raume durch den Strom erzeugte Licht haben wir bis zu Geißlers Röhren kennengelernt. Daß gerade Geißler diese Röhren so gut herstellte und erst seit dieser Zeit (1855) die Röhren so weite Verbreitung fanden, hängt damit zusammen, daß Geißler 1855 seine Quecksilberluftpumpe erfunden hatte. Wir haben erwähnt, daß Plücker ausgedehnte Versuche auch spektroskopisch an diesen Röhren vornahm (Pogg. Ann. 103, p. 88, 1858, und fünf weitere bis 107, p. 77, 1859). Jetzt interessiert uns eine Beobachtung aus dieser Reihe: Plücker beobachtete,

daß von der —-Platinelektrode kleine Teilchen abgerissen und auf der Glaswand niedergeschlagen wurden. Er meint deswegen, daß das Licht aus den beim Abreißen glühend gewordenen Teilchen bestände und erinnert sich an die oben erwähnten Versuche Davys über die Ablenkung des Lichtbogens durch den Magneten. Nun hat er weiter beobachtet, daß die Glaswand während dieser Entladung in der Röhre mit einem Phosphoreszenzlicht in der Nähe der Kathode aufleuchtet und daß die Lage dieser leuchtenden Stellen durch Änderung des Magnetfeldes verschoben werden könne. Hittorf fand, daß, wenn er zwischen die punktförmige Kathode und die Stelle, wo das Phosphoreszenzlicht erschien, einen festen Körper stellte, nun ein Schattenbild erzeugt wurde auf der Glaswand; daraus schloß er, daß das Kathodenlicht sich geradlinig ausbreite (Pogg. Ann. 136, p. 1 u. 197, 1869). Varley (1828—1883), welcher diese Versuche wiederholte, erklärte, daß die Strahlen aus kleinsten, materiellen Teilen bestehen, die vom negativen Pol durch die Elektrizität fortgeschleudert würden und wegen ihrer —-Ladung durch ein Magnetfeld beeinflußt würden (Proc. R. S. 19, p. 236, 1871). Nun untersuchte Goldstein diese Erscheinung, erweiterte Hittorfs Beobachtung dadurch, daß die negative Elektrode nicht punktförmig zu sein brauchte, um solche Schatten zu erzeugen, da die Strahlen im Gegensatz zu den von einer leuchtenden Fläche ausgehenden Strahlen nicht nach allen Seiten gerichtet seien, sondern senkrecht auf der aussendenden Fläche standen. Er führte die Bezeichnung Kathodenstrahlen und Kathodenlicht ein (Ber. Berlin 1876, p. 279).

Die weitere Untersuchung wurde etwas aufgehalten durch die Aufsehen erregende Hypothese des vierten Aggregatzustandes von Crookes, der bei sehr hoher Evakuierung um die —-Elektrode einen schwarzen Raum sich ausbreiten sah. Crookes wollte denselben so erklären, daß die Moleküle des noch übrig gebliebenen Gasrestes durch Berührung mit der Kathode —-Ladung erhalten und fortgeschleudert werden, aber erst Lichterzeugung hervorbringen, wenn sie miteinander zusammenstoßen (Phil. Trans. 170, p. 135 u. 641, 1879). Daraus erklärte er die Entstehung des dark space. Crookes stellte in der Tat ausgezeichnete Röhren her und reiste viel, um seine Entdeckung zu verbreiten. Sein Vortrag vor der Brit. Ass. wurde auch deutsch von Gretschel 1879 herausgegeben. Er bewies darin, daß diese „strahlende Materie“, d. h. die Kathodenstrahlen, aus negativen Teilchen bestehen, daß sie beim Anprall an ein Hindernis starke Erwärmung erzeugen. Diese

Tatsachen sind natürlich unabhängig von der Theorie, die Crookes damit verband.

Hittorf hatte beobachtet (l. c.), daß durch die Einwirkung des Magneten die Strahlen schraubenförmige Windungen machen. Riecke zeigte (Wied. Ann. 13, p. 191, 1881), daß sich ein mit Elektrizität geladenes, materielles Teilchen in der Tat so um die magnetischen Kraftlinien bewegen muß.

Gegen die von Varley, Crookes und Riecke vertretene Anschauung, daß die Kathodenstrahlen aus — geladenen Teilchen bestehen, wandten sich: Tait (Proc. R. S. Edinb. 10, p. 430, 1880), indem er den Dopplereffekt suchte, aber nicht fand; E. Wiedemann in einer langen Untersuchung (Wied. Ann. 9, p. 160; 10, p. 202, 1880); Hertz, da er äußere magnetische und elektrische Wirkungen nicht finden kann und es ihm auch nicht gelingt, durch ein elektrostatisches Feld eine Einwirkung auf die Kathodenstrahlen zu erzeugen (ib. 19, p. 782, 1883); Goldstein mit ähnlichen Gedankengängen wie Wiedemann (ib. 12, p. 249, 1881). Ein besonderes Gewicht erhielten diese Einwendungen durch die Experimente von Hertz, daß die Kathodenstrahlen fähig sind, für Licht durchlässige dünne Metallhäute auch diffus zu durchdringen (ib. 45, p. 28, 1892), was mit der Anschauung bewegter materieller Teile unverträglich sein sollte. Jedoch gab J. J. Thomson in demselben Jahre eine Erklärung dafür (Recent. Research., p. 126). Diese Durchdringungsversuche führten Lenard zur Konstruktion von Röhren mit Aluminiumfenster, durch welches die Kathodenstrahlen aus der Röhre diffus austreten (Wied. Ann. 51, p. 225, 1894, und 52, p. 23, 1894). In demselben Jahre gelang es nun aber J. J. Thomson, mit der Methode des rotierenden Spiegels die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen zu messen. Er fand $1{,}9 \cdot 10^7$ cm/sec. Das ist eine so außerordentlich viel kleinere Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit, daß die Hertzsche Ansicht, die Kathodenstrahlen mit Bewegung des Äthers zu identifizieren (l. c., p. 807), unmöglich erscheint. Der andere Grund, den Hertz gegen die Varleysche These anführte, wurde von Perrin widerlegt, indem er zeigte, daß ein elektrostatisches Feld im Innern der Röhre tatsächlich Ablenkung der Kathodenstrahlen entsprechend der Ansicht von — geladenen Teilchen hervorruft (C. R. 121, p. 1130, 1895). Das gleiche Resultat fand J. J. Thomson bei starker Evakuierung der Röhre (Phil. Mag. 44, p. 298, 1897). Aber Thomson ging weiter; die elektrostatische und magnetische Ablenkung gibt einen Weg zur Bestimmung des Verhältnisses der Masse zur Ladung m/e. Er findet etwa

10^{-7} CGS/E., d. h. etwa den tausendsten Teil des Wertes von *m/e* für ein H-Ion. Daraus schließt er, daß wir es hierbei zu tun haben mit den ursprünglichen Einheiten, aus welchen letztlich alle Atome zusammengesetzt sind. Den gleichen Wert findet für *m/e* Kaufmann (Wied. Ann. 61, p. 544, 1897), unabhängig von Thomson. Kaufmann aber schließt daraus, daß die Hypothese von den abgeschleuderten Teilchen nicht ausreiche. Das erlösende Wort sprach Fitzgerald (Electrician 1897, 21. 5): We are dealing with free electrons in these cathode rays.

Kanalstrahlen.

Schon bei seinen Versuchen über die Abhängigkeit des Kathodenlichtes von der Lage der Elektroden hatte Goldstein versucht, auch einen Einfluß der Anode auf dies Licht festzustellen (Wied. Ann. 12, p. 90 u. 249, 1881), aber erst, als er eine durchlöcherte Kathode anwandte, sah er, daß in dem hinter dieser Elektrode liegenden Raume Strahlen erschienen, die er, weil sie durch die Löcher der Kathode geradlinig sich fortpflanzten, Kanalstrahlen nannte; sie hatten also die entgegengesetzte Richtung wie die Kathodenstrahlen (Ber. Berlin 1886, p. 691). Eine sorgfältige Untersuchung dieser Strahlen lieferte erst 1897 W. Wien (Wied. Ann. 65, p. 440, 1898) und zeigte, daß die Teilchen +-Ladung haben, daß aber das Verhältnis von Masse und Ladung hier sehr viel größer ist als bei den Kathodenstrahlen, und daß diese Verhältnisse sich in der gleichen Größenordnung zueinander verhalten, wie das entsprechende Verhältnis bei der Elektrolyse. Für letztere hatte schon Schuster (Proc. R. S. 47, p. 526, 1890) die Meinung ausgesprochen, daß die Diffusion der Ionen sehr verschieden groß ist, und zwar für die —-Ionen erheblich größer als für die +-Ionen. Dieses Verhältnis wurde von Zeleny für ionisierte Luft bestätigt (Phil. Mag. 46, p. 120, 1898).

Leitung der Gase.

Für die bei den Untersuchungen über Kathoden- und Kanalstrahlen aufgestellten Theorien war es von Wichtigkeit, welche Vorstellung man von der Leitung der Elektrizität durch Gase hat. Durch die Untersuchungen aus ältester Zeit bis auf Ries war übereinstimmend festgestellt, daß Luft und alle Gase bei Zimmertemperatur unter normalem Druck in reinem Zustande überhaupt nicht leiten und nur nach der Wilkeschen Vorstellung (s. oben) dielektrisch

polarisiert werden können. Allein schon durch die Untersuchungen von Hawksbee (l. c.) 1708 war gezeigt, daß im luftverdünnten Raume die Luft und andere Gase leitend sind. Durch O. von Guerickes Beobachtung (l. c.) war der leitende Charakter der Flamme entdeckt, durch Franklin (l. c.) war die Erregung von Elektrizität in der Flamme nachgewiesen. Aber über das „Wie“ war man sich nicht klar. Unipolare Leitung und Übergangswiderstand spielten die wesentlichste Rolle (s. Fechner, Lehrbuch der Elektr., 1829). Mit diesen Annahmen war die Meinung verbunden, daß für die Flammengase das Ohmsche Gesetz nicht gültig sei. Ich habe gezeigt, daß, wenn man thermoelektrische und elektrochemische Wirkungen kompensiert, das Ohmsche Gesetz auch für Flammengase gültig ist (Wied. Ann. 2, p. 83, 1877). Das ist von Giese bestätigt (ib. 17, p. 1, 236, 519, 1882).

Aber Giese untersucht hier auch die Frage, wie die Leitung zu denken sei. Schon Hittorf hatte in seiner großen Arbeit über die Elektrizitätsleitung in Gasen (ib. 7, p. 553, 1879) es wahrscheinlich gemacht, daß bei erhöhter Temperatur in den Gasen ein gleicher Zustand gegeben sei wie bei den Elektrolyten, ohne jedoch diese Idee eindeutig durchzuführen. Giese entwickelt nun folgende Theorie: „Man nimmt an, daß es einzelne, schon vor Eintritt des elektrischen Vorganges im Elektrolyten vorhandene Atome oder Atomgruppen, welche für sich keine geschlossenen Moleküle bilden, die sogenannten Ionen, seien, welche den Vorgang der Stromleitung vermitteln, indem sie sich in Richtung der Kraftlinien fortbewegen und dabei elektrische Ladung mit sich führen. Im engsten Anschluß an diese Vorstellung soll angenommen werden, daß auch in den Gasen das Leitungsvermögen an das Vorhandensein von Ionen in dem soeben definierten Sinne gebunden sei. Nach den herrschenden Anschauungen über die Konstitution der Gase sollten sich Ionen in jedem Gase schon bei gewöhnlicher Temperatur und Atmosphärendruck vorfinden, wenn auch in geringer Menge; mit steigender Temperatur wächst ihre Zahl.“ Bei Temperaturen unter 100° sind nur sehr wenig Ionen vorhanden, z. B. in Luft nur wenig Stickstoffatome und Sauerstoffatome. Durch Berührung mit einem glühenden Draht werden aber eine größere Anzahl Moleküle zertrümmert und dadurch Ionen erzeugt. Wenn die Temperatur sinkt, werden die Ionen sich wieder zu Molekülen zusammenfinden können; je schneller die Abkühlung erfolgt, um so mehr Ionen bleiben dann unverbunden, und so kann ein Gas auch bei niederer Temperatur leitend werden; so erklärt sich die Wirkung in Geißlerschen Röhren. Ebenso

erklärt sich das Leitungsvermögen der Flammengase. Hier ist also zum ersten Male die Wirkung der Glühelektrode nachgewiesen (l. c., p. 538ff.). Daß zur Erhöhung der Leitfähigkeit außer der Glühelektrode auch die Entladung einer Batterie beiträgt, hat schon Perrot nachgewiesen (Ann. de Chim. et de Phys. 61, p. 161, 1861). Zu der gleichen Forderung, daß in den Gasen, wenn sie leitend werden sollen, eine Dissoziation der Gasmoleküle notwendig ist, kam auch Schuster (Proc. R. S. 37, p. 317, 1884). Es handelt sich also darum, Hilfsmittel zu finden, um das Gas zu ionisieren (ib. 42, p. 371, 1887). Schuster zeigt in dieser Arbeit nun, daß ein durch eine abgeschlossene Gasmasse gehender Entladungsstrom die Leitfähigkeit des Gases so außerordentlich erhöht, daß selbst ganz schwache elektromotorische Kräfte ausreichen, um einen Stromschluß zu erhalten, und sieht die Ursache davon in der Ionisierung der Luft durch den Entladungsstrom. Hertz knüpfte an die Resonanzerscheinungen an, die ihm die elektrischen Wellen gebracht hatten. Er bemerkt, daß in der induzierten Leitung der Funke sehr viel stärker war, wenn das von dem induzierenden Funken ausgehende Licht ungehindert die zweite Funkenstrecke traf. Dann stellte er fest, daß auch andere irdische Lichtquellen diese Wirkung auf den „passiven" Funken ausüben, besonders die Lichtquellen, welche reich sind an violetten und ultravioletten Strahlen, daß dagegen Sonnenlicht diese Wirkung nicht habe (Wied. Ann. 31, p. 983, 1887). Eine Erörterung über die theoretische Bedeutung dieser Beobachtungen gibt Hertz nicht. Anders Arrhenius (ib. 32, p. 545, 1887) nach Versuchen, die in das Jahr 1886 zurückreichen. Er meint, wie die ultravioletten Strahlen besonders geeignet sind, Phosphoreszenz zu erzeugen, so sind sie auch geeignet, die Beweglichkeit der Ionen zu erhöhen, was er für Elektrolyte bei Haloidsalzen des Silbers nachgewiesen hat (Ber. Wien 96, II, p. 831, 1887). Er erklärt auch die Nichtwirksamkeit des Sonnenlichtes dadurch, daß die ultravioletten Strahlen in der Atmosphäre absorbiert sind. Daß gerade diese Strahlen es sind, welche die Wirkung ausüben, zeigten die Versuche von E. Wiedemann und Ebert (Wied. Ann. 33, p. 241, 1888). Die Lichtquelle war das Bogenlicht, dem die ultraviolette Strahlung durch vorgestellte Glasplatten genommen werden konnte. Die Funkenstrecke lieferte die Influenzmaschine. Sie stellten dabei fest, daß die Belichtung der Anode oder der Funkenstrecke selbst ohne Elektroden keinerlei Einfluß auf die Häufigkeit und die Intensität der Entladungsfunken hat, daß dagegen die Bestrahlung der Kathode eine starke Strahlung erzeugt. Sie wollen ihre Experimente erklären

durch die Annahme, welche E. Wiedemann (ib. 20, p. 781, 1883) ausgesprochen hatte, daß die Kathodenstrahlen Undulationsschwingungen des Äthers sind.

Inzwischen hatten Elster (1854—1920) und Geitel (1855 bis 1923) den Einfluß der Glühelektroden auf ein umgebendes Gas festgestellt und gefunden, daß auch ein heißer, nicht leuchtender Luftstrom die Glühelektrode und im Gase schwebende Partikeln —-elektrisch lädt (ib. 19, p. 500, 1883, und 22, p. 123, 1884). Dabei werden die Gase mit Ausnahme des H +-elektrisch für alle Temperaturen oberhalb der Rotgluttemperatur. Diese Elektrisierung findet auch in luftverdünnten Räumen statt. Dabei erhalten die Gase unipolares Leitungsvermögen. Die Leitung der Gase ist eine elektrolytische (ib. 31, p. 109, 1887; 37, p. 315, 1889, und 38, p. 27, 1889). Im Anschluß an die oben mitgeteilten Versuche von Hertz und Arrhenius untersuchte Hallwachs den Einfluß des ultravioletten Lichtes auf geladene isolierte Konduktoren. Die negativen Ladungen werden erheblich entladen, die + nahezu gar nicht (ib. 33, p. 301, 1888). Diesen Hallwachseffekt machten Elster und Geitel nach, legten sich aber nun die Frage vor, ob die Natur des Konduktors dabei mitspiele. In der Tat, sie fanden, daß von den festen Metallen Zink am besten diesen Effekt zeigt. Da Zn nun stark + nach der Spannungsreihe steht, glaubten sie, die noch weiter nach der +-Seite liegenden Alkalimetalle würden den Effekt noch stärker zeigen. In der Tat zeigte ihn eine blanke Natriumfläche in stark verdünnter Luft; während die große Mehrzahl der Metalle nur auf violette und ultraviolette Strahlen reagierten, war hier auch rotes Licht wirksam; so stellten sie den Satz auf: Je elektropositiver ein Metall ist, um so mehr ist es nach langen Wellen hin erregbar (ib. 41, p. 162, 1890; 42, p. 564, und 43, p. 225, 1891). Sie kamen zu der Ansicht, daß die lichtelektrischen Erscheinungen eine Art Resonanzerscheinungen seien und mit Phosphoreszenz zusammenhängen, so daß die phosphoreszierenden Substanzen ähnlich den natürlichen fluoreszierenden Mineralien lichtelektrisch empfindlich seien (ib. 44, p. 722, 1891). Den Einfluß eines Magnetfeldes auf die lichtelektrische Entladung stellten sie dahin fest, daß die letztere abhängig sei von dem Winkel, den die Kraftlinien mit der Kathodenoberfläche bilden (ib. 46, p. 285, 1892). Polarisiertes Licht wirkt auf eine Alkalikathode am stärksten, wenn die Polarisationsebene senkrecht zur Einfallsebene steht. Der photoelektrische Strom sollte dann auch vom Einfallswinkel und der Absorption des Lichtes an der Kathode abhängen (ib. 52, p. 413, 1894, und 61, p. 445, 1897).

Erst nach mehr als 10 Jahren wurden diese Verhältnisse durch die Arbeit von Pohl und Pringsheim 1910/11 geklärt. Elster und Geitel haben aber auch bereits erkannt, daß der Photostrom der Intensität des Lichtes proportional sei; darum schlugen sie ein Photometer mit Benutzung der Photoelektrizität vor (l. c. 48, p. 625, 1893).

Bei der Untersuchung der Kathodenstrahlen schlossen sich Elster und Geitel der Auffassung von Hertz und E. Wiedemann an, daß sie dem Lichte verwandte Schwingungen seien, aber sie fanden die neue Eigenschaft derselben, daß sie auf gewisse Chlor-, Jod- und Bromsalze reduzierend wirken und sie dabei photoelektrisch empfindlich machen (ib. 56, p. 733, 1895; 59, p. 497, 1896; 62, p. 599, 1897). Der Einfluß der glühenden Elektroden auf die umgebende Luft war, wenn auch unverstanden, schon im 18. Jahrhundert beobachtet. Ein rotglühendes Schüreisen einem geladenen, kleinen Konduktor bis auf 3—4 Zoll genähert, bewirkte sofort eine Verminderung, wenn nicht gänzliche Zerstörung der Ladung, so sagt Canton (Phil. Trans. 52, p. 457, 1762). Diese Fähigkeit glühender Körper, die Luft leitend zu machen, war dann wieder entdeckt von E. Becquerel (Ann. de Chim. et de Phys. 39, p. 355, 1853) und bestätigt von Guthrie (Phil. Mag. 46, p. 254, 1873). Eine Deutung des Vorganges gab J. J. Thomson. Er bestimmte das Verhältnis der Ladung zu der Masse der — geladenen Ionen, welche von einem heißen Kohlefaden in verdünntem Wasserstoff erzeugt werden, durch Beobachtung ihrer Ablenkung in einem Magnetfeld. Der erhaltene Wert war nahezu derselbe wie der für die Teilchen der Kathodenstrahlen. Daraus schloß er, daß die von dem heißen Kohlefaden ausgesandten Ionen negative Elektronen seien (ib. 48, p. 547, 1899). Die Fortführung dieser Versuche gehört in das zwanzigste Jahrhundert.

Röntgenstrahlen.

Die oben erwähnten Versuche von Hertz über die Durchlässigkeit dünner Metallplatten für Kathodenstrahlen veranlaßten Lenard, Röhren mit Aluminiumfenster herzustellen (wie auch schon oben bemerkt) und nun die Kathodenstrahlen zu beobachten, welche durch die Fenster ausgetreten sind in die Luft. Daß die durch das Aluminium ausgetretenen Strahlen diffus sind, hatte schon Hertz (Wied. Ann. 45, p. 31, 1892) beobachtet. Lenard zeigt, daß die Intensität der durch die Strahlen erregten Fluoreszenz nur von der Entfernung abhängt, nicht von der Richtung zu dem

Fenster. Die Atmosphäre verhält sich diesen Strahlen gegenüber wie ein trübes Medium; er kann also die Dispersion nachweisen. Statt der Fluoreszenzschirme wendet Lenard auch die photographische Platte an, deren Empfindlichkeit für Kathodenstrahlen schon von Goldstein (Ber. Berlin 1880, p. 84) nachgewiesen war. Er untersucht die Ausbreitung der Strahlen im Vakuum und anderen Gasen als Luft und macht auf den Unterschied dieser Strahlen von den Lichtstrahlen aufmerksam, daß nämlich für Lichtstrahlen auch von kleinster Wellenlänge die Materie sich wie ein Kontinuum verhält, dagegen für Kathodenstrahlen scheint jedes Molekül ein besonderes Hindernis zu bieten und den Äther zu trüben (Wied. Ann. 51, p. 225, 1894). Er glaubt, daß seine Versuche den Nachweis erbringen, daß die Kathodenstrahlen Schwingungen des Äthers sind und findet in einer folgenden Arbeit über den Einfluß eines Magnetfeldes (ib. 52, p. 23, 1894), daß die Ablenkung der Strahlen von der Wirkung eines starken Magnetfeldes in dem Medium ganz unabhängig ist, dagegen muß das Magnetfeld direkt auf den Äther eingewirkt haben.

An diese Arbeiten Lenards knüpft Röntgen an. Er umkleidet ein stark evakuiertes Lenardsches Rohr mit einem schwarzen Karton, der alle sichtbaren und ultravioletten Strahlen ausschließt (Ber. Würzburg 1895, Dez.; Wied. Ann. 64, p. 1, 1898) und findet überall in der Nähe dieses Entladungsapparates die Fluoreszenz eines Bariumplatinzyanürschirmes bzw. die Schwärzung einer photographischen Platte. Es entsteht die Frage, ob man es hier auch mit Kathodenstrahlen Lenardscher Art zu tun habe. Lenard hatte Quarz von $^1/_2$ mm Dicke als gänzlich undurchlässig gefunden, ebenso Metallplatten von gleicher Dicke. Röntgen fand aber diese Substanzen durchlässig, doch verschieden stark. Am undurchlässigsten erwies sich Blei, welches schon in 1,5 mm undurchlässig war, während Aluminium noch mit 15 mm, Tannenholz noch bei 3 cm Dicke durchlässig waren. Die Prüfung der Strahlen in bezug auf Reflexion, Brechung, Ablenkung durch das magnetische Feld zeigte, daß diese X-Strahlen, wie sie Röntgen nannte, etwas ganz anderes sein müssen als die Kathodenstrahlen. Als Ausgangsstelle für die X-Strahlen findet er die Stelle der Wand des Entladungsapparates, die am stärksten fluoresziert. Dann untersucht Röntgen die Wirkung seiner Strahlen auf elektrisch geladene Körper und zeigt, daß die Strahlen die Ladung vernichten, und stellt fest, daß alle Körper, die von Kathodenstrahlen getroffen werden, imstande sind, solche X-Strahlen auszusenden, daß für

ihre Entstehung also notwendig ist, daß die Kathodenstrahlen auf ein Hindernis stoßen. In der dritten Arbeit von 1897 stellt es sich heraus, daß die Entladungsröhren nach dem Grade ihrer Verdünnung X-Strahlen sehr verschiedener Durchdringungsstärke erzeugen, so daß, wenn die Röhren, welche das geringste Entladungspotential erfordern als weich, die das höchste verlangen als hart bezeichnet werden, die harten Röhren Strahlen stärkerer Durchdringung liefern. Daß die Röntgenstrahlen auch Reflexion haben, war schon von Röntgen selbst nachgewiesen an Platin, Blei und Zink, allgemeiner von Winkelmann und Straubel (Wied. Ann. 59, p. 324, 1896). Dieselben wiesen auch die Absorption, die diffuse Ausbreitung durch verschiedene Medien und die Fluoreszenzerregung nach. Fomm untersuchte die Beugungserscheinungen und gibt als obere Grenze für die Wellenlänge $14 \cdot 10^{-6}$ mm an (ib., p. 350, 1896).

Von Untersuchungen über die Strahlen phosphoreszierender Körper ging H. Becquerel aus. Er untersuchte unter anderem auch Uransulfat. Er legte auf eine photographische Platte, die durch eine dicke schwarze Papphülle vor den sichtbaren Lichtstrahlen geschützt war, ein Stück dieses Salzes und ließ dasselbe mehrere Stunden von Sonnenlicht bestrahlen. Dann fand er nach Abnahme der Papphülle auf der photographischen Platte eine Silhouette der phosphoreszierenden Substanz, und er glaubte, daß diese die Papphülle durchdringenden Strahlen durch das Sonnenlicht in dem Salze erregt seien (C. R. 122, p. 420, 1896). Diese Beobachtung hatte er am 24 Febr. der Akademie mitgeteilt. Am 2. März teilte er mit, daß das Uransalz die Eigenschaft, solche Strahlen auszusenden, noch immer habe, obwohl es dem Sonnenlicht nicht wieder ausgesetzt war und also von einer Phosphoreszenz nicht mehr die Rede sein könne; so müsse man schließen, daß die Aktivität eine dauernde Eigenschaft des Uransalzes sei (ib., p. 501). Im Verfolg dieser Entdeckung macht Becquerel die Beobachtung, daß die Strahlen des Metalls selbst wie auch aller Uransalze die +- und —-elektrischen Ladungen gleich gut zerstreuen (ib., p. 559 u. 790). Elster und Geitel haben darauf aufmerksam gemacht, daß Uran und seine Salze, obwohl sie violette und ultraviolette Strahlen sehr gut absorbieren, lichtelektrisch unempfindlich sind, im Gegensatz zu allen anderen Substanzen, welche diese Absorption zeigen (Ber. Nat.-Ver. Braunschweig 10, 1897). Diese Eigenschaft der Unempfindlichkeit wurde von G. C. Schmidt auch am Thorium und dessen Salzen nachgewiesen (Wied. Ann. 64, p. 720, 1898) und in Analogie zum Uran fand er nun auch die Aktivität

des Thoriums im Aussenden solcher Becquerelstrahlen (ib. 65, p. 141, 1898). Becquerel hatte schon 1896 (l. c.) gefunden, daß die Uranstrahlen auch die Fähigkeit haben, wie die Kathodenstrahlen die Luft leitend zu machen, d. h. zu ionisieren. Beattie und de Smolan zeigten, daß diese erzeugte Leitfähigkeit bei abnehmenden Gasdruck vermindert wurde (Phil. Mag. 43, p. 431, 1897). Im folgenden Jahre bestätigte Madame Curie die Entdeckung Schmidts in bezug auf Thorium; aber es gelang ihr weiter, aus der mineralischen Pechblende zwei neue, äußerst aktive Substanzen abzusondern, das Polonium und Radium (C. R. 127, p. 175 und 1215, 1898) und Elster und Geitel fanden, daß auch das aus Uranerz ausgefällte Bleisulfat radioaktiv ist (Wied. Ann. 69, p. 87, 1899).

Es entstand natürlich nun die Frage, woher der Energieersatz kommt für diese dauernde Ausstrahlung. Crookes meinte, die Substanzen Uran und Thorium hätten die Eigenschaft, von den sie treffenden Luft- und Gasmolekülen einen Teil der Energie zu absorbieren und in Strahlungsenergie umzuwandeln (Nature 58, p. 438, 1898). Madame Curie glaubte, daß die Welt mit Strahlen von noch größerer Durchdringungskraft als die der Röntgenstrahlen erfüllt sei; Uran und Thorium hätten die Fähigkeit, diese zu absorbieren (C. R. 126, p. 1101, 1898). Elster und Geitel zeigten nun durch Versuche mit Pechblende von Joachimsthal, daß beide Hypothesen unhaltbar seien (Wied. Ann. 66, p. 735, 1898). Dann teilten sie am 19. 1. 1899 im naturw. Verein mit, daß, da die Eigenschaft, Becquerelstrahlen auszusenden, allen chemischen Verbindungen eines radioaktiven Elementes zukomme, die Ursache schwerlich in einer chemischen Wirkung zu suchen sei. Vielmehr glauben sie: „daß das Atom eines radioaktiven Elementes nach Art des Moleküls einer instabilen Verbindung unter Energieabgabe in einen stabilen Zustand übergeht. Allerdings würde diese Vorstellung zu der Annahme einer allmählichen Umwandlung der aktiven Substanz zu einer inaktiven nötigen, und zwar folgerichtigerweise unter Änderung ihrer elementaren Eigenschaften“ (ib. 69, p. 83, spez. 88, 1899). Bekanntlich nahmen Rutherford und Soddy diesen Gedanken in ihrer grundlegenden Arbeit über die Zerfallstheorie der Atome wieder auf (Phil. Mag. 4, p. 376 u. 569, 1902).

Rutherford fand, daß die Uranstrahlen in zwei Typen zerfallen, die α- und β-Strahlen, von denen die α-Strahlen schnell absorbiert werden, während die β-Strahlen eine größere Durchdringungs-

kraft haben (ib. 47, p. 109, 1899). Nun zeigte Giesel, daß ein Teil der Becquerelstrahlen durch das Magnetfeld abgelenkt wird, ein anderer aber nicht (Wied. Ann. 69, p. 814, 1899), und das wurde von Becquerel bestätigt (C. R. 129, p. 996 u. 1205, 1899). Die Curies zeigten darauf, daß der ablenkbare Teil der Strahlen —-elektrisch geladen sei (ib. 130, p. 647, 1900) und Becquerel ergänzte dies, indem er die Ablenkung der β-Strahlen auch im elektrischen Kraftfeld bewies (ib., p. 809). Da sich dann auch für diese Strahlen der Wert des Verhältnisses von Masse zur Ladung von der Ordnung 10^{-7} ergab, so konnte die Identität der β-Strahlen mit den Kathodenstrahlen behauptet werden.

Elektronen.

In demselben Jahre 1895, in welchem Röntgen durch die Entdeckung der nach ihm benannten Strahlen die Grundlage für die neuzeitliche Strahlungstheorie legte, erschien die Arbeit von H. A. Lorentz: Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern, und damit die Grundlage für die neuzeitliche Elektronentheorie. Freilich kommt in der Arbeit der Name Elektron nicht vor, er redet nur von Ionen; aber die Ionen, welche er meint, sind identisch mit Elektronen. Das Wesen der Theorie ist der atomistische Aufbau der Elektrizität. Die Entstehung dieser Theorie hat eine doppelte Wurzel. Die in der Lorentzschen Darstellung zunächst in die Augen springende Ableitung geht von der Elektrolyse aus. Schon Ritter hatte erklärt (Voigts Mag. II, p. 380, 1800, und Gilb. Ann. 9, p. 281, 1801), daß die Zersetzungsprodukte in der Elektrolyse von Wasser, Salzlösungen und Säuren ganz bestimmte und konstante Ladungen von positiver und negativer Elektrizität den Elektroden zuführten (natürlich ohne diese Bezeichnung). Die gleiche Anschauung kehrt wieder bei Faraday, der die Bezeichnungen hinzufügt. Die mit Elektrizität geladenen ponderablen Elementarteile der Zersetzung, die Ionen, haben eine unveränderliche elektrische Ladung (Exp. Res., S. VII, § 662—665 u. 869ff.). Diese Faradaysche Grundannahme macht Helmholtz zur Grundlage seiner am 5. April 1881 vor der Chem. Soc. gehaltenen Faraday Lecture (Journ. of t. Chem. Soc. 39, p. 277, 1881, und Wiss. Abhandl. III, p. 52, 1895) und verbindet damit den Hittorfschen Nachweis, daß der Transport der Ionen den elektrischen Strom darstellt. Ich hebe folgende Sätze daraus hervor: The same definite quantity of either positive or negative

electricity moves always with each univalent ion, or with every unit of affinity of a multivalent ion, and accompanies it during all its motions through the interior of the electrolytic fluid. This quantity we may call the eleetric charge of the atom (p. 69); ... every unit of affinity is charged with one equivalent either of positive or of negative electricity (p. 86). Helmholtz kommt auf dies Elementarquantum zurück in der Arbeit: Elektromagnetische Theorie der Farbenzerstreuung (Wied. Ann. 48, p. 389 u. 721, 1893). Er zeigt darin, daß diese Vorstellung mit den Maxwellschen Gleichungen in Einklang zu bringen ist, wenn man den Maxwellschen Integrationskonstanten reelle Substantialität verleiht und die Hypothese hinzufügt, „daß die Zentralpunkte elektrischer Kräfte bei chemischen Aktionen von einem zum anderen Ion herübergleiten können, und zwar unter großer Arbeitsleistung, so, als ob sie an einem substantiellen Träger hafteten, der von den Valenzstellen verschiedenartiger Ionen mit verschiedener Kraft angezogen würde".

Nahezu gleichzeitig mit der Helmholtzschen Lecture hielt G. Johnstone Stoney am 16. Feb. 1881 vor der R. Soc. in Dublin eine lecture über die physikalischen Einheiten der Natur; er fügt der Veröffentlichung den Zusatz bei, daß diese Arbeit bereits der Brit. Ass. auf dem Belfast Meeting 1874 vorgetragen sei (Proc. Dublin 3, p. 51, 1881). Eine frühere Veröffentlichung scheint es nicht zu geben. Er sagt: Die Natur gibt uns eine ganz bestimmte Quantität von Elektrizität, unabhängig von den besonderen Körpern, auf welche sie wirkt, als Einheit in dem Faradayschen Gesetz, daß bei jeder chemischen Zersetzung in der Elektrolyse eine ganz bestimmte Quantität Elektrizität mit jedem Ion Wasserstoff verbunden ist, die in allen Fällen dieselbe bleibt, die will ich E_1 nennen. Diese Größe ist auf folgende Art festzulegen. Nach Loschmidt sind in einem Kubikmillimeter 10^{18} (richtiger $2{,}5 \cdot 10^{18}$) Moleküle, also in einem Liter 10^{24}. Ein Liter H bei Atmosphärendruck wiegt etwa 1 Dezigramm, also ist die Masse eines Moleküls $H = 10^{-25}$. Das chemische Atom ist die Hälfte. Für jedes Ampère werden etwa 10^{-5} g Wasserstoff zersetzt. Die metrische Einheit e_1 der Elektrizität ist 100 Ampère; die wird also 1 mg H zersetzen. Dies enthält 10^{22} Atome, also ist

$$E_1 = \frac{1}{10^{22}} \cdot e_1 = 10^{-20} \text{ Amp.}$$

Das ist also die fundamentale Einheit, welche uns die Natur selbst bietet. Geht man von dieser aus, so ist die Einheit der Länge

10^{-37} Meter, der Zeit $= \frac{1}{3} \cdot 10^{-45}$ Sekunden, der Masse $= \frac{1}{10^7}$ Gramm. Stoney hat hier nur das Ziel, ein, wie er meint, wirklich absolutes Maßsystem zu begründen. Er spricht darum nur von der unity of electricity und gebraucht niemals das Wort Elektron. Ich habe diese sehr verdienstliche Arbeit Stoneys so ausführlich besprochen, weil die Mythenbildung sich ihrer bemächtigt hat. Trotzdem rührt der Name Elektron von Stoney her. In seiner Arbeit (Phil. Mag. 40, p. 372, 1895) führt er für das Webersche Atom den Namen Elektron ein mit der Definition: the charge of electricity, which are associated with chemical bonds.

Der zweite Weg zur Elektronentheorie geht vom Coulombschen Gesetz aus und ist von Weber sehr weitgehend durchgeführt. Schon in der ersten Arbeit über elektrische Maßbestimmungen (Abhandl. z. Begründ. d. Ges. d. Wiss., Leipzig 1846) behandelt er $+e$ und $-e$ als zwei selbständige Atome, welche Wechselwirkung aufeinander ausüben. Sie haben selbst Masse, die aber so geringfügig ist, daß sie gegenüber der ponderablen Masse vernachlässigt werden kann. Diese atomistische Auffassung der Elektrizität zieht sich durch alle Arbeiten Webers, so daß er wiederholt von einem Aggregatzustand der Elektrizität redet. Aus der Arbeit über das Prinzip der Erhaltung der Energie (Abhandl. Leipzig 10, 1871, Werke IV, p. 247) zitiere ich folgende Sätze: „Bei der allgemeinen Verbreitung der Elektrizität darf angenommen werden, daß an jedem ponderablen Atom ein elektrisches Atom haftet." „Eine Drehung der beiden elektrischen Teilchen umeinander fordert eine Anziehungskraft, wenn die beiden Teilchen in gleicher Entfernung voneinander bleiben sollen." Für gleichartige e und e_1 ist eine solche Drehung nicht möglich. Bei der Drehung ungleichartiger Teilchen, also $+e$ und $-e$, können sie aber ihre Entfernung voneinander innerhalb gewisser Grenzen ändern. Das Verhältnis beider Teilchen in Beziehung auf Teilnahme an der Bewegung (Drehung) hängt von dem Verhältnis ihrer Massen ε und ε_1 ab, wobei die an den elektrischen Atomen haftenden ponderablen Atome in den ε und ε_1 eingeschlossen sind. Es sei e das $+$-elektrische Teilchen, das negative sei $-e$. Nur an diesem hafte ein ponderables Atom, wodurch seine Masse so vergrößert werde, daß die Masse des $+$-Teilchens dagegen als verschwindend betrachtet werden dürfte. Das Teilchen $-e$ wird dann als ruhend und bloß das Teilchen $+e$ als in Bewegung um das Teilchen $-e$ herum befindlich betrachtet werden können. Es stellen dann die beiden ungleichartigen Teilchen einen Molekular-

strom dar. In zwei weiteren Arbeiten (Pogg. Ann., Jubelband 1874, p. 199, und 156, p. 1, 1875) führt Weber diese Gedanken für spezielle Probleme aus, erklärt damit den Unterschied von Konduktoren und Isolatoren, die Ladung auf der Oberfläche der Konduktoren, die Wärmewirkung des Stromes, den Peltiereffekt, das Thermoelement und die Leitung. Wie sich Weber diese elektrischen Atome gedacht hat, geht aus den im Nachlaß herausgegebenen Aufzeichnungen hervor. Es heißt da (Werke IV, p. 490): Jedes ponderable Molekül enthält gleiche Mengen +- und —-Elektrizität, deren Massen aber verschieden sein können. Es braucht nicht ein +- und ein —-Teilchen das Molekül zu bilden; das ist nur beim H der Fall. In den anderen Elementen sind $+n$ und $-n$ elektrische Teilchen, und zwar entspricht n dem Atomgewicht (p. 496), z. B. C hat 12 +- und 12 —-elektrische Atome für ein Molekül C. — Die ponderablen Moleküle können auch elektrische Trabanten einfangen (p. 498) und dadurch verändert werden. Es ergibt sich die Forderung, daß alle Elemente ganzzahlige Atomgewichte haben. Die Bahnen der Trabanten um den Kern sowie die Geschwindigkeiten, mit welchen sie kreisen, können verschieden sein. Aus diesen Verschiedenheiten folgen die verschiedenen Grade chemischer Aktion. Die Aufgabe besteht darin, aus dem elektrischen Grundgesetz unter Annahme geeigneter Bewegungen der elektrischen Atome den Aufbau der ponderablen Materie und die Wärme- und Lichterscheinungen zu erklären. Speziell die Lichterscheinungen sind dadurch erklärbar, daß die Störung des Gleichgewichts durch die Bewegung der +-Atome durch Wellenbewegung fortgepflanzt wird (p. 524). In einem Leiter sind die Kerne der Moleküle (Atome) — geladen, die +-elektrischen Atome kreisen um dieselben und können fortgeschleudert werden; das ist die Strahlung. Die fortgeschleuderten treffen auf Nachbarmoleküle und können dort wieder zum Rotieren kommen, wenn dort auch eine Fortschleuderung stattgefunden hat. Wenn eine elektromotorische Kraft wirkt, so werden diese fortgeschleuderten Atome von ihrer geradlinigen Bahn abgelenkt wie der geworfene Stein durch die Schwerkraft. Maßgebend für die Ablenkung ist die mittlere Weglänge, die jedes Teilchen Elektrizität vom Orte der Ausstrahlung bis zum Orte des absorbierenden Moleküls zurücklegen muß (p. 509). Weber selbst berechnet mit diesen Annahmen die wahre Stromintensität, die elektromotorische Kraft, den Widerstand.

Die Weber'sche Idee über die Elektrizitätsleitung in Metallen kehrt wieder bei Giese, der den Strom in Metallen auch durch

wandernde Ionen darstellt (Wied. Ann. 37, p. 576, 1889). Auch die oben erwähnte letzte Auffassung von Helmholtz, daß ein Molekül eines Elementes, z. B. des H, stets aus einer gleichen Anzahl +- und —-„Elementarteile" = elektrischen Atomen bestehe, also ein Molekül H = [H_{+1}, H_{-}] aufzufassen sei, ist mit der 20 Jahre früher bekannt gegebenen Weberschen Theorie identisch. Die aus dem Nachlaß Webers angeführten Zitate zeigen das moderne Atommodell, nur mit umgekehrten Vorzeichen. Aber diese Vorzeichen konnte Weber noch nicht entscheiden, denn es gab noch keine Kathoden und Röntgen- und Becquerelstrahlen. Besonders beachtenswert scheint mir, daß er die Lichtstrahlung aus dem Austritt eines kreisenden Atoms aus seiner Bahn ableitet. Die Weberschen Ideen liegen ferner zum Grunde in den Arbeiten von F. Kohlrausch zur Erklärung der Thermoelektrizität (Gött. Nachr. 1874, p. 65) und der Ableitung der Reibungs- und Berührungselektrizität aus elektrischen Atomen, die er Ionen nennt, durch Christiansen (Wied. Ann. 53, p. 401, 1894, bis 62, p. 545, 1897). Auch die Arbeit von Riecke zur Theorie des Galvanismus und der Wärme (ib. 66, p. 353 u. 545, 1898) und Wiecherts über Elektrodynamik ruhen auf Weberschen Anschauungen (Gött. Nachr. 19. 3. 1898) und H. A. Lorentz kann sie in der oben zitierten fundamentalen Arbeit von 1895 nicht entbehren.

Lorentz geht freilich aus von der alten Streitfrage, ob der Äther ruhe, wie Young (Phil. Trans. 1804, p. 12) und Fresnel (Ann. de Chim. et de Phys. 9, p. 57, 1818) annehmen, oder ob er an der Rotation der Erde in ihrer Nachbarschaft teilnehme, wie Stokes wollte (Phil. Trans. 27, p. 9, 1845; 28, p. 76; 29, p. 6, 1846), und erinnert an die Schwierigkeiten, welche sowohl der Stokesschen Theorie (Lorentz, Arch. Néerl. 21, p. 103, 1887; Zitt. Acad. Amsterd. 1892, p. 97), wie der Fresnelschen (Michelson, Amer. Journ. of Sc. 22, p. 120; 34, p. 333, 1887) erwachsen. Lorentz hatte schon gezeigt, daß die elektromagnetische Lichttheorie zu den Fresnelschen Gleichungen führt (La theor. electrom., 1892). Um nun beides, Elektrizität und Licht, zu umfassen, nimmt er die „Ionentheorie" an und sagt selbst, daß das eine Rückkehr zu den Weberschen Anschauungen sei (l. c., p. 8). Er verbindet dann mit der Maxwellschen Theorie die Vorstellung, daß allein die Ionen Träger der Elektrizität sind. Lorentz gebraucht dauernd die Bezeichnung Ion, ebenso J. J. Thomson, obwohl dadurch eine Zweideutigkeit eingeführt war, denn hier bei Lorentz und Thomson handelt es sich nicht immer um die elektrolytischen Ionen, sondern meistens um

elektrische Atome im Weberschen Sinne. Trotzdem hat sich die obenerwähnte Bezeichnung Stoneys, Elektron, erst sehr langsam eingeführt. Außer den beiden obengenannten Forschern haben noch viele andere immer Ion gesagt. Ich erinnere nur an Plancks Arbeit zu Ehren Lorentz' (Arch. Néerl. 1900, p. 164), der freilich in der Einleitung von Ionen „oder Elektronen" redet, dann aber nur von Ionen spricht. Erst durch Drudes Bemerkung (Ann. d. Phys. 1, p. 566, 1900), daß es wünschenswert sei, den Namen Ion nur für die elektrolytischen Träger der Elektrizität zu reservieren, dagegen die Weberschen Atome als Elektronen zu bezeichnen, hat sich diese sachgemäße Unterscheidung durchgesetzt, wenn auch in englischen Arbeiten noch für längere Zeit die Bezeichnung Ionen sich erhalten hat.

Lorentz hatte zunächst die Genugtuung, daß er mit seiner Elektronentheorie den Zeemaneffekt erklären konnte. Es war freilich schon früher ähnliches angedeutet. Nach Jones' Angaben (Life of Faraday II, p. 449) soll Faraday in der letzten Zeit seines Lebens sich mit dem Gedanken getragen haben, Wechsel in der Polarisation des Lichtes festzustellen durch Beobachtung der in einem starken Magnetfeld aufgestellten Natriumflamme, jedoch ohne Erfolg. Tait kommt in einer theoretischen Beobachtung über zirkular polarisiertes Licht zu der Schlußfolgerung, daß rechts und links polarisiertes Licht in einem Magnetfelde verschiedene Änderungen der Wellenlänge erleiden müßte, so daß eine ursprünglich einzelne schwarze Linie doppelt werden müßte (Proc. Edinb. 9, p. 118, 1875). Jedoch Zeeman war von diesen beiden Notizen unbeeinflußt, als er sein oben beschriebenes Experiment ausführte. Lorentz erklärt dasselbe. Wenn e die Ladung, m die Masse eines Elektrons, r die Abweichung desselben von der Gleichgewichtslage, K die magnetische Kraft bedeuten, so ist das äußere magnetische Kraftfeld $e \cdot [\dot{r} \cdot K]$. Ist die Kraft, welche das Elektron in seiner Bahn hält, $= k^2 r$, so ist die Bewegungsgleichung des Elektrons

$$m \ddot{r} + k^2 r = e [\dot{r} \cdot K].$$

Durch geeignete Zerlegung kommt er zu der Lösung, wenn n die Frequenz der Schwingung ist, daß 1. für r parallel zu K die Gleichung gilt $k^2 - m n^2 = 0$ oder 2. für r senkrecht zu K die Gleichung $(k^2 - m n^2) = e n K$, und diese gibt zwei Werte für n. So haben wir drei Lösungen für die Wellenlänge, d. h. eine einfache Linie wird in drei Komponenten aufgespalten.

Das Jahr 1895/96 ist eine Grenzmarke der physikalischen Forschung. Die Röntgen- und Becquerelstrahlen mit der Konsequenz von Elster und Geitel über den Atomzerfall, die Bemühungen um das Strahlungsgesetz, welche schließlich in die Plancksche Quantentheorie ausmünden, der Zeemaneffekt und die von Lorentz gegebene Grundlage der Elektronentheorie sind die wesentlichsten Quellen der neuen Forschungsperiode. Es war meine Aufgabe, zu zeigen, wie diese Quellen aus verschiedenen, zum Teil recht langen Strömungsfäden entstanden sind und somit der Zusammenhang der Forschung der sogenannten klassischen Zeit mit der Neuzeit sichtbar wird. Wenn auch hier in dem Fortschritt der Erkenntnis nicht die Stetigkeit des Kontinuums, sondern die Diskontinuität in sprunghafter Entwicklung herrschend ist, so hat die alte mit der neuen Zeit diese Eigenschaft gemeinsam. Es ist die Individualität, welche auch bei der wissenschaftlichen Arbeit den Ausschlag gibt. Der Mensch ist eben keine Maschine, und die wissenschaftliche Entdeckung ist nicht ein Produkt des Zufalls.

Λαμπάδια ἔχοντες διαδώσουσιν ἀλλήλοις!

Namenverzeichnis.

Sachverzeichnis.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

آخری درج شدہ تاریخ پر یہ کتاب مستعار
لی گئی تھی مقررہ مدت سے زیادہ رکھنے کی
صورت میں ایک آنہ یومیہ دیرانہ لیا جائے گا۔